

TUGAS AKHIR - TM 141585

STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN DARRIEUS- SAVONIUS DENGAN VARIASI PENEMPATAN ROTOR SAVONIUS

ILMAWAN YANUARSYAH
NRP 2112 100 044

Dosen Pembimbing
Vivien Suphandani, ST, ME, PhD.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - TM 091585

**STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN DARRIEUS-SAVONIUS
DENGAN VARIASI PENEMPATAN ROTOR SAVONIUS**

ILMAWAN YANUARSYAH
NRP 2112 100 044

Dosen Pembimbing
Vivien Suphandani, ST, ME, PhD.

Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017



FINAL PROJECT - TM 091585

**NUMERICAL STUDY ON DARRIEUS-SAVONIUS WIND
TURBINE WITH SAVONIUS ROTOR PLACEMENT
VARIATION**

ILMAWAN YANUARSYAH
NRP 2112 100 044

Academic Advisor
Vivien Suphandani, ST, ME, PhD.

Mechanical Engineering Department
Faculty of Industrial Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017

STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN DARRIEUS-SAVONIUS DENGAN VARIASI PENEMPATAN ROTOR SAVONIUS

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

ILMAWAN YANUARSYAH

NRP. 2112 100 044

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Vivien Suphandani, ST, ME, PhD. (Pembimbing)
NIP. 198105292003122001
2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT. (Penguji I)
NIP. 197104051997021001
3. Dr. Bambang Arip Dwiyantoro, ST, M.Eng. (Penguji II)
NIP. 197804012002121001
4. Prof. Dr. Ir. Sutardi, M.Eng. (Penguji III)
NIP. 196412281990031002

SURABAYA

JANUARI, 2017

STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN DARRIEUS- SAVONIUS DENGAN VARIASI PENEMPATAN ROTOR SAVONIUS

Nama Mahasiswa : Ilmawan Yanuarsyah
NRP : 2112 100 044
Jurusan : Teknik Mesin, FTI
Dosen Pembimbing : Vivien Suphandani, ST, ME, PhD.

Abstrak

Konsumsi energi listrik untuk menunjang kesejahteraan manusia semakin meningkat seiring berjalannya waktu. Sedangkan sumber daya alam tidak terbarukan yang saat ini masih menjadi bahan bakar utama dalam pembangkit listrik semakin menipis. Para ilmuwan dan insinyur dituntut untuk segera mencari metode alternatif untuk menanggulangi hal ini. Penelitian tentang pemanfaatan energi terbarukan menjadi semakin populer untuk dikembangkan. Salah satunya adalah dengan memanfaatkan energi angin yang tersedia dimanapun dan kapanpun. Pemanfaatan energi angin oleh turbin angin memerlukan penelitian terlebih dahulu sebelum diaplikasikan sehingga instalasi turbin angin dapat bekerja dengan optimum. Oleh karena itu penelitian tentang turbin angin harus selalu dilakukan dan dikembangkan.

Studi numerik tentang pengaruh penempatan rotor Darrieus pada instalasi turbin angin hybrid Darrieus-Savonius dilakukan untuk mengetahui konfigurasi yang lebih baik. Studi numerik dilakukan dengan memodelkan turbin angin dalam penampang 3D menggunakan software STAR-CCM+ 9.02.007-R8. Variasi yang dilakukan dalam studi numerik ini adalah penempatan turbin angin Savonius di tengah rotor Darrieus dan penempatan turbin angin Savonius di bawah rotor Darrieus. Dalam studi numerik ini dimodelkan turbin angin Darrieus eggbeater dikombinasikan dengan turbin angin Savonius dual-stage dengan masing-masing stage memiliki jumlah sudu

sejumlah dua sudu. Kecepatan angin divariasikan pada kecepatan 5, 10, dan 15 m/s.

Hasil penelitian yang didapatkan dari penelitian ini adalah adanya interaksi aliran antara rotor Savonius yang diletakkan di tengah rotor Darrieus yang menyebabkan performa masing-masing rotor tidak bekerja dengan optimal. Torsi yang dihasilkan turbin angin dengan peletakan rotor Savonius di bawah rotor Darrieus lebih tinggi daripada turbin angin rotor Savonius yang diletakkan di tengah rotor Darrieus. Secara umum koefisien daya turbin angin rotor Savonius yang diletakkan di tengah rotor Darrieus lebih baik daripada turbin angin rotor Savonius yang diletakkan di bawah rotor Darrieus disebabkan dimensi keseluruhan turbin angin yang berbeda.

Kata Kunci : Studi Numerik, Energi Terbarukan, Turbin Angin, Darrieus-Savonius, Koefisien Daya.

NUMERICAL STUDY ON DARRIEUS-SAVONIUS WIND TURBINE WITH SAVONIUS ROTOR PLACEMENT VARIATION

Student Name : Ilmawan Yanuarsyah
NRP : 2112 100 044
Department : Teknik Mesin
Academic Advisor : Vivien Suphandani, ST, ME, PhD.

Abstract

Electrical power consumption is in the rising, in order to accommodate human needs. In contrast, the non-renewable energy source is still used to generate electricity is running low. Scientists and engineers are conducting researches on alternative ways to address this problem. Studies on renewable energy is currently one of the main concerns across the globe. One of the alternatives present are the use of wind energy which is still underutilized even though its availability is high. To aid its development, studies on wind turbine are conducted before its implementation on the field, to ensure its optimal use.

Numerical studies on the effect of Darrieus rotor placement on the installation of Darrieus-Savonius hybrid wind turbine is conducted to find out the optimum adjustment. The numerical study is conducted by modelling the wind turbine on a three-dimensional section, using STAR-CCM+ 9.02.007-R8 as the software running the simulation. The variations on this numerical study is the placement of the Savonius wind turbine in the center of the Darrieus rotor, and the placement of the Savonius wind turbine below the Darrieus rotor. On this numerical study, the Darrieus eggbeater wind turbine, combined with the dual stage Savonius wind turbine, where each stage consists of two impellers, with the variation of wind velocity of 5, 10, and 15 m/s.

From this study, it is found that there are interactions between the Savonius rotor which is placed in the center of the Darrieus rotor, resulting in worse performance on each rotors.

The resulting torsion of the wind turbine with the variation of the placement of the Savonius rotor below the Darrieus rotor is higher than the variation where the Savonius rotor is placed in the center of the Darrieus rotor. From the numerical study, it is found that wind turbine power coefficient of the variation where the Savonius rotor is placed in the center of the Darrieus rotor is better than the variation in which the Savonius rotor is placed below the Darrieus rotor, because of the whole dimension of the wind turbines that is used for the variations are different.

Key Words : *Numerical Studies, Renewable Energy, Wind Turbine, Darrieus-Savonius, Power Coefficient.*

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr, Wb.

Segala puji bagi Allah SWT. Atas berkat dan karunia yang telah diberikan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulisan banyak mendapatkan kritik, saran, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Keluarga Bapak Sjaiful Bachri yang telah memberikan dukungan moril serta doa yang diistajabah sehingga penulis diberi kelancaran oleh Allah SWT dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Ibu Vivien Suphandani, ST, ME, PhD., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu membimbing penulis dengan penuh kesabaran.
3. Seluruh dosen dan tenaga pendidik yang telah mewariskan ilmu kepada penulis sebagai bekal untuk menyelesaikan tugas akhir.
4. Seluruh angkatan M55. Teman-teman Lab. Mekanika Fluida, Dananta, Surya, Ulul, dan Arwanda. Teman-teman Lab. Simanu, Gunawan, Eden, Nagata, Lintang, Rian, Moses, Bagus, dan Ben atas segala bentuk dukungan yang telah diberikan.
5. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya laporan Tugas Akhir ini.

Kami menyadari laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Akhir kata penulis berharap agar tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi semua.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xvii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat	4

BAB II DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori	5
2.1.1 Energi angin	5
2.1.2 Turbin angin	6
2.1.3 <i>Vertical axis wind turbine</i>	8
2.1.3.1 Turbin angin Savonius	8
2.1.3.2 Turbin angin Darrieus	10
2.1.3.3 Turbin angin Darrieus-Savonius	12
2.1.4 Koefisien daya	13
2.1.5 <i>Tip speed ratio</i>	14
2.1.6 <i>Time step</i>	15
2.2 Tinjauan Pustaka	16
2.2.1 Dwiyantoro et. al. (2015)	16
2.2.2 Ghosh et. al. (2015)	19
2.2.3 Rassoulinejad-Mousavi et. al. (2013)	22
2.2.4 Wakui T et. al. (2014)	23

BAB III METODOLOGI

3.1 Variasi dan <i>Domain</i> Simulasi	27
3.1.1 Variasi.....	27
3.1.2 <i>Domain</i> simulasi	27
3.2 Tahap <i>Pre Processing</i>	28
3.2.1 Pembuatan geometri dan <i>meshing</i>	28
3.2.2 <i>Boundary conditions</i>	34
3.2.3 Parameter	36
3.2.3.1 <i>Models</i>	36
3.2.3.2 <i>Materials</i>	37
3.2.3.3 <i>Rotating motion</i>	37
3.3 Tahap <i>Processing</i>	37
3.4 Tahap <i>Post Processing</i>	37
3.5 Contoh Perhitungan	38
3.5.1 Perhitungan <i>time step</i>	38
3.5.2 Perhitungan <i>tip speed ratio</i>	39
3.5.3 Perhitungan koefisien daya	39
3.6 <i>Flowchart</i> Penelitian	39

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Permodelan	43
4.2 <i>Grid Independent Test</i>	43
4.3 Pembahasan Turbin Angin Tipe A	44
4.3.1 Kontur kecepatan	45
4.3.2 Kontur tekanan.....	51
4.3.3 Kontur tekanan.....	55
4.4 Pembahasan Turbin Angin Tipe B	61
4.4.1 Kontur kecepatan	61
4.4.2 Kontur tekanan.....	68
4.4.3 Torsi.....	73
4.5 Perbandingan Tipe A dan Tipe B	79
4.6 Torsi dan Koefisien Daya.....	81

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	89
----------------------	----

5.2 Saran.....	90
DAFTAR PUSTAKA	91
BIOGRAFI	93

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Kapasitas energi terbarukan secara global (REN21 2014).	5
Gambar 2.2	Total kapasitas bangkitan energi angin global (GWEC 2012).	7
Gambar 2.3	Bangkitan energi angin menurut tiap negara (TECHNICA 2012).	8
Gambar 2.4	(a) Overlap ratio pada turbin angin Savonius, e. (b) Variasi <i>stage</i> Savonius (Saha et. al. 2008).	10
Gambar 2.5	Variasi bentuk turbin angin Darrieus. (Willy Tjiu et. al. 2014).	11
Gambar 2.6	Turbin angin Darrieus-Savonius. (Wakui T et. al. 2014).	12
Gambar 2.7	Grafik koefisien daya dibandingkan dengan <i>tip speed ratio</i> untuk variasi <i>wind turbine</i> (HAU 2006).	15
Gambar 2.8	Layout Turbin Angin Darrieus-Savonius (Dwiyantoro et. al. 2015).	16
Gambar 2.9	Grafik hubungan antara putaran turbin angin terhadap kecepatan angin (Dwiyantoro et. al. 2015).	17
Gambar 2.10	Grafik hubungan antara koefisien daya turbin angin model terhadap TSR (Dwiyantoro et. al. 2015).	18
Gambar 2.11	Geometri turbin angin Darrieus-Savonius. (Ghosh et. al. 2015).	19
Gambar 2.12	<i>Domain</i> dan <i>boundary conditions</i> turbin angin Darrieus-Savonius. (Ghosh et. al. 2015).	20
Gambar 2.13	(a) <i>Meshing</i> untuk simulasi permodelan. (b) <i>Meshing</i> di sekitar turbin angin untuk simulasi permodelan. (Ghosh et. al. 2015).	20

Gambar 2.14	Grafik perbandingan C_p dengan TSR untuk turbin angin Darrieus-Savonius dengan variasi <i>overlap ratio</i> 16,8%. (Ghosh et. al. 2015).	21
Gambar 2.15	Grafik perbandingan C_p hasil studi numerik dengan C_p hasil studi eksperimen untuk turbin angin Darrieus-Savonius dengan variasi <i>overlap ratio</i> 16,8%. (Ghosh et. al. 2015).	21
Gambar 2.16	(a) Turbin angin Savonius di tengah Darrieus h-rotor. (b) Turbin angin Savonius di bawah Darrieus h-rotor. (Rassoulinejad-Mousavi et. al. 2013).	22
Gambar 2.17	Grafik Kecepatan angin dengan C_p . (Rassoulinejad-Mousavi et. al. 2013).	23
Gambar 2.18	(a) Turbin angin tipe A. (b) Turbin angin tipe B. (Wakui T et. al. 2014).	24
Gambar 2.19	Grafik perbandingan koefisien torsi terhadap <i>tip speed ratio</i> . (Wakui T et. al. 2014).	25
Gambar 2.20	Grafik perbandingan koefisien daya terhadap <i>tip speed ratio</i> . (Wakui T et. al. 2014).	25
Gambar 3.1	(a) Konfigurasi tipe A. (b) Konfigurasi tipe B.	28
Gambar 3.2	Gambar teknik konfigurasi tipe A. (a) Tampak atas. (b) Tampak samping. (c) Tampak depan.	29
Gambar 3.3	Gambar teknik konfigurasi tipe B. (a) Tampak atas. (b) Tampak samping. (c) Tampak depan.	30
Gambar 3.4	(a) Sudu Savonius dua sudu. (b) Sudu Darrieus <i>symmetry</i> NACA0024.	31
Gambar 3.5	Dimensi permodelan konfigurasi tipe A.	32
Gambar 3.6	Dimensi permodelan konfigurasi tipe B.	32

Gambar 3.7	<i>Meshing</i> (a) <i>Volume mesh</i> permodelan simulasi. (b) <i>Mesh</i> di permukaan turbin angin.	33
Gambar 3.8	(a) <i>Meshing</i> pada sumbu xz konfigurasi tipe A. (b) <i>Meshing</i> di sekitar sudu Darrieus. (c) <i>Meshing</i> di sekitar sudu Savonius.	34
Gambar 3.9	<i>Boundary conditions</i> untuk konfigurasi tipe A.	35
Gambar 3.10	<i>Boundary conditions</i> untuk konfigurasi tipe B.	36
Gambar 3.11	<i>Flowchart</i> umum penelitian.	40
Gambar 3.12	<i>Flowchart</i> simulasi numerik.....	42
Gambar 4.1	Grafik <i>error</i> dari nilai torsi terhadap jumlah <i>cell</i>	44
Gambar 4.2	(a) Perpotongan penampang xz yang digunakan untuk menampilkan kontur aliran. (b) Posisi turbin angin pada <i>upper plane</i> pada sudut 0°. (c) Posisi turbin angin pada <i>lower plane</i> pada sudut 0°	45
Gambar 4.3	Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 0°, 45°, dan 90° dengan kecepatan angin 15 m/s.....	47
Gambar 4.4	Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 135°, 180°, dan 225° dengan kecepatan angin 15 m/s.	48
Gambar 4.5	Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 270°, dan 315° dengan kecepatan angin 15 m/s.....	49
Gambar 4.6	Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 270° dengan variasi kecepatan angin pada <i>upper plane</i>	50

Gambar 4.7	Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 0° , 45° , dan 90° dengan kecepatan angin 15 m/s.....	52
Gambar 4.8	Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 135° , 180° , dan 225° dengan kecepatan angin 15 m/s.	53
Gambar 4.9	Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 270° dan 315° dengan kecepatan angin 15 m/s.....	54
Gambar 4.10	Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 270° dengan berbagai kecepatan angin pada <i>upper plane</i>	55
Gambar 4.11	Definisi bagian untuk pengambilan data torsi	56
Gambar 4.12	Hasil torsi pada sudu Savonius dengan kecepatan angin 15 m/s.....	57
Gambar 4.13	Hasil torsi pada Savonius dengan berbagai macam kecepatan	57
Gambar 4.14	Hasil torsi pada sudu Darrieus dengan kecepatan angin 15 m/s.....	59
Gambar 4.15	Hasil torsi pada Darrieus dengan berbagai macam kecepatan	59
Gambar 4.16	Hasil torsi untuk satu putaran turbin angin tipe A	60
Gambar 4.17	(a) Perpotongan penampang xz yang digunakan untuk menampilkan kontur aliran. (b) Posisi turbin angin pada <i>upper plane</i> pada sudut 0° . (c) Posisi turbin angin pada <i>lower plane</i> pada sudut 0°	61
Gambar 4.18	Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 0° , 45° , dan 90° dengan kecepatan angin 15 m/s.....	63
Gambar 4.19	Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 135° , 180° , dan 225° dengan kecepatan angin 15 m/s.	64

Gambar 4.20	Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 270° dan 315° dengan kecepatan angin 15 m/s.....	65
Gambar 4.21	Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 270° pada kecepatan 5 m/s (<i>upper plane</i> dan <i>lower plane</i>) dan kecepatan 10 m/s (<i>upper plane</i>).....	66
Gambar 4.22	Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 270° pada kecepatan 10 m/s (<i>lower plane</i>) dan kecepatan 10 m/s (<i>upper plane</i> dan <i>lower plane</i>).....	67
Gambar 4.23	Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 0°, 45°, dan 90° dengan kecepatan angin 15 m/s	69
Gambar 4.24	Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 135°, 180°, dan 225° dengan kecepatan angin 15 m/s	70
Gambar 4.25	Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 270° dan 315° dengan kecepatan angin 15 m/s	71
Gambar 4.26	Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 270° dengan variasi kecepatan angin pada <i>upper plane</i> (sebelah atas) dan <i>lower plane</i> (sebelah bawah)	73
Gambar 4.27	Definisi bagian untuk pengambilan data torsi.....	74
Gambar 4.28	Hasil torsi pada sudu Savonius dengan kecepatan angin 15 m/s	75
Gambar 4.29	Hasil torsi pada Savonius dengan berbagai macam kecepatan.....	75
Gambar 4.30	Hasil torsi pada sudu Darrieus dengan kecepatan angin 15 m/s	77

Gambar 4.31 Hasil torsi pada Darrieus dengan berbagai macam kecepatan.	77
Gambar 4.32 Hasil torsi untuk satu putaran turbin angin tipe B.....	78
Gambar 4.33 Visualisasi <i>streamline</i> pada <i>isometrical view</i> pada kedua konfigurasi turbin angin	79
Gambar 4.34 Visualisasi <i>streamline</i> pada <i>side view</i> dan <i>top view</i> pada kedua konfigurasi turbin angin	80
Gambar 4.35 Grafik torsi turbin angin tipe A dan tipe B.....	82
Gambar 4.36 Grafik torsi turbin angin tipe A dan tipe B.....	83
Gambar 4.37 Grafik torsi rata-rata terhadap kecepatan angin	84
Gambar 4.38 Grafik koefisien daya terhadap <i>tip speed ratio</i>	86
Gambar 4.39 Perbandingan grafik koefisien daya terhadap <i>tip speed ratio</i>	87

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tabel Perbandingan Koefisien Daya Savonius, Darrieus, dan <i>Hybrid</i> (Kumar et. al. 2014).	13
Tabel 2.2	Data Konfigurasi Turbin Angin (Wakui T et. al. 2014).	24
Tabel 3.1	Variasi Penelitian	27
Tabel 4.1	Data Permodelan.....	43
Tabel 4.2	Data <i>Grid Independent Test</i>	43
Tabel 4.3	Torsi Rata-rata Satu Putaran Turbin	84

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peradaban manusia yang semakin berkembang pesat menuntut kemajuan teknologi yang bisa memenuhi kebutuhan manusia. Untuk menciptakan negara yang sejahtera salah satu hal utama yang harus diperhatikan adalah pembangunan infrastruktur. Sedangkan untuk menyokong pembangunan infrastruktur yang baik diperlukan energi listrik yang memadai. Semakin menuanya usia bumi ini, pembangkit listrik konvensional yang menggunakan bahan bakar yang berasal dari sumber daya alam tidak terbarukan mulai dipertimbangkan keberadaannya. Pasalnya kebutuhan listrik semakin meningkat sedangkan ketersediaan sumber daya alam tidak terbarukan semakin menipis. Oleh karena itu penelitian dan pengembangan pembangkit listrik menggunakan sumber daya alam terbarukan perlu untuk dikerjakan.

Bentuk permukaan bumi di beberapa negara memiliki karakteristik tertentu sehingga mengakibatkan adanya aliran udara yang bisa dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tenaga angin. Salah satu negara yang sudah memanfaatkan kondisi ini adalah Belanda yang sejak tahun 1970 menggunakan kincir angin sebagai pembangkit listrik. Indonesia juga merupakan negara yang memiliki potensi angin yang cukup besar untuk dimanfaatkan, sehubungan dengan kecepatan rata-rata angin di Indonesia mencapai 5 m/s. Seiring dengan Program Listrik 35.000 MW yang diusung oleh pemerintah, maka potensi alam Indonesia juga harus dimaksimalkan.

Biaya investasi yang harus disiapkan untuk pembangunan sebuah pembangkit listrik tenaga listrik tidaklah murah. Oleh karena itu diperlukan penelitian untuk mengetahui tipe-tipe pembangkit listrik tenaga angin terbaik yang akan dibangun sehingga biaya investasi digunakan secara maksimal. *Vertical Axis Wind Turbine* merupakan salah satu tipe pembangkit listrik

tenaga angin yang sedang populer untuk dikembangkan. Jenis VAWT yang sering digunakan adalah jenis Savonius dan Darrieus. Masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Sehingga pada beberapa kasus kedua jenis tersebut digabungkan untuk memaksimalkan fitur *wind turbine* tersebut.

Pada tahun 2015 Dwiyantoro et. al. melakukan uji eksperimen dengan membangun sebuah turbin angin kombinasi Darrieus-Savonius. Dari konfigurasi turbin angin yang dibuat dapat menghasilkan daya sebesar 500 W pada putaran 742 rpm dengan kecepatan angin sebesar 7,5 m/s. Rassoulinejad-Mousavi et. al. (2013) melakukan uji eksperimen turbin angin Darrieus-Savonius dengan variasi peletakan turbin angin Savonius berada di tengah Darrieus h-rotor, dan peletakan Savonius di bawah Darrieus h-rotor. Hasil yang didapatkan bahwa peletakan turbin angin Savonius di tengah Darrieus h-rotor menghasilkan koefisien daya yang lebih baik daripada peletakan turbin angin Savonius di bawah Darrieus h-rotor. Pada tahun 2014 Wakui T et. al. melakukan pengembangan Darrieus *eggbeater* dikombinasikan dengan Savonius *dual-stage*. Variasi yang digunakan adalah peletakan Savonius di tengah Darrieus dan peletakan Savonius di bawah Darrieus. Hasil yang diperoleh adalah bahwa peletakan Savonius di bawah Darrieus menghasilkan nilai koefisien daya yang lebih baik. Namun berkaitan dengan kekokohan bentuk rotor, peletakan Savonius di tengah Darrieus lebih direkomendasikan.

Pada penelitian kali ini, penulis akan melakukan studi numerik terhadap pengaruh konfigurasi dari kombinasi turbin angin Savonius dan Darrieus. Pemilihan bentuk kombinasi ini memanfaatkan kemampuan *self-starting* dari Savonius dan efisiensi yang baik dari Darrieus. Savonius dengan konfigurasi *dual-stage two-blade* dipilih karena merupakan konfigurasi terbaik dalam meningkatkan performa Savonius. Darrieus dengan bentuk *eggbeater* digunakan karena memiliki kemampuan menghasilkan daya yang tinggi dan penggunaannya pada kondisi

ekstrem. Variasi yang dilakukan adalah dengan meletakkan rotor Savonius di tengah rotor Darrieus yang selanjutnya akan disebut sebagai konfigurasi tipe A, dan meletakkan rotor Savonius di bawah rotor Darrieus yang selanjutnya akan disebut sebagai konfigurasi tipe B. Sehingga didapatkan hasil koefisien daya yang berbeda dan bisa didapat kesimpulan permodelan manakah yang lebih baik.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana interaksi aliran di sekitar turbin angin Darrieus-Savonius?
2. Bagaimana pengaruh konfigurasi peletakan turbin angin Savonius dan Darrieus?
3. Bagaimana performa yang dihasilkan oleh permodelan turbin angin?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui kontur aliran yang melewati turbin angin Darrieus-Savonius.
2. Membandingkan pengaruh peletakan rotor Savonius pada performa turbin angin.
3. Menganalisa koefisien daya yang dihasilkan oleh permodelan turbin angin.

1.4 Batasan Masalah

Pada permodelan studi numerik ini terdapat beberapa batasan masalah yang digunakan untuk membatasi lingkup penelitian, yaitu :

1. Tipe *wind turbine* yang digunakan adalah tipe Darrieus tipe *eggbeater* sejumlah tiga sudu dikombinasikan dengan tipe Savonius *dual stage* sejumlah dua sudu untuk masing-masing *stage*.

2. Studi numerik dilakukan pada penampang tiga dimensi dengan kondisi *unsteady*.
3. Software yang digunakan untuk simulasi adalah STAR-CCM+ 9.02.007-R8.
4. Aliran melewati turbin angin dengan kondisi *incompressible*.
5. Arah datangnya aliran diasumsikan datang dari satu arah yakni dari *inlet region*.
6. Putaran turbin disimulasikan dengan *rotation motion*.
7. Aspek kondisi lingkungan di lapangan, *ground clearance*, dan material konstruksi turbin angin tidak diikut sertakan dalam permodelan.

1.5 Manfaat

Manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah :

1. Dapat dijadikan referensi untuk penelitian dan pengembangan *wind turbine* di masa yang akan mendatang.
2. Biaya yang dikeluarkan untuk penelitian ini relatif kecil jika dibandingkan dengan memodelkan dengan metode eksperimen.

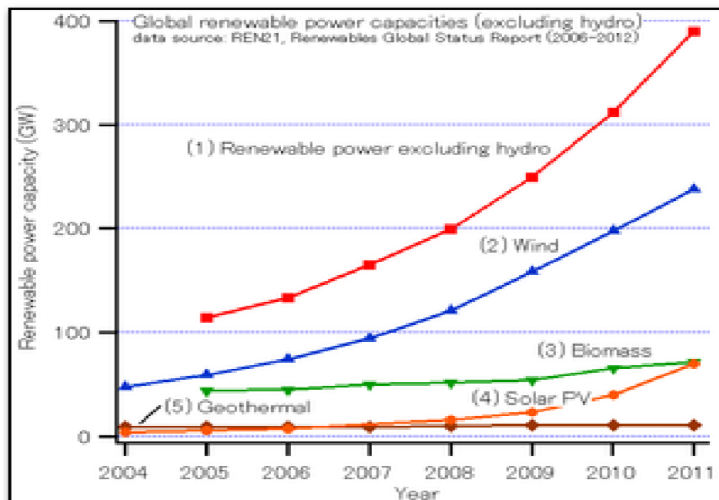
BAB II

DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

2.1.1 Energi angin

Energi terbarukan mencakup fenomena alam seperti cahaya matahari, angin, gelombang laut, dan panas geotermal. Cahaya matahari dan angin merupakan energi alternatif yang paling populer dibandingkan dengan sumber energi terbarukan yang lainnya. Kedua macam sumber energi ini mampu menopang energi listrik seluruh dunia selama lima puluh tahun kedepan, dan juga bisa mengatasi permasalahan *global warming*. Gambar 2.1 menunjukkan potensi kapasitas sumber energi terbarukan di seluruh dunia.



Gambar 2.1 Kapasitas energi terbarukan secara global (REN21 2014).

Energi angin memiliki potensi untuk mengatasi kebutuhan daya dari seluruh dunia jika dapat dikonversi menjadi

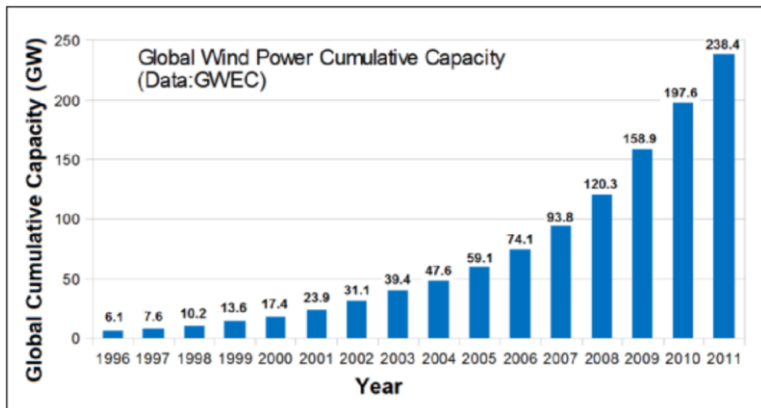
listrik secara efisien. Angin akan menjadi energi alternatif yang paling populer karena ketersediaannya di seluruh tempat dan waktu. Bebas polusi dan sumberdaya yang berkelanjutan. Kerugiannya adalah efisiensi yang didapatkan lebih rendah dan biaya instalasi tinggi. Tapi biaya akhir akan menjadi relatif lebih murah jika beroperasi terus menerus dan turbin skala kecil dapat digunakan di setiap sudut dunia.

2.1.2 Turbin angin

Turbin angin adalah suatu alat yang digunakan untuk mengkonversi energi mekanik yang dimiliki oleh angin menjadi energi listrik. Pada umumnya turbin angin memiliki bentuk yang didesain sedemikian rupa sehingga jika terkena aliran udara akan menyebabkan sudu bergerak. Sudu ini disambungkan ke sebuah rotor, sehingga ketika angin menabrak turbin angin, turbin angin akan bergerak dan secara bersamaan menggerakkan rotor. Rotor tersebut disambungkan ke sebuah generator yang akan mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Listrik yang dihasilkan dari turbin angin bergantung dari seberapa kencang angin yang mengenai turbin angin. Semakin tinggi kecepatan angin yang mengenai turbin angin maka turbin angin akan berputar dengan kecepatan putar yang semakin tinggi. Hal ini akan membuat rotor berputar semakin cepat. Begitupula seiring dengan semakin tingginya putaran yang dihasilkan oleh rotor, maka semakin tinggi pula energi listrik yang dapat dikonversi oleh generator.

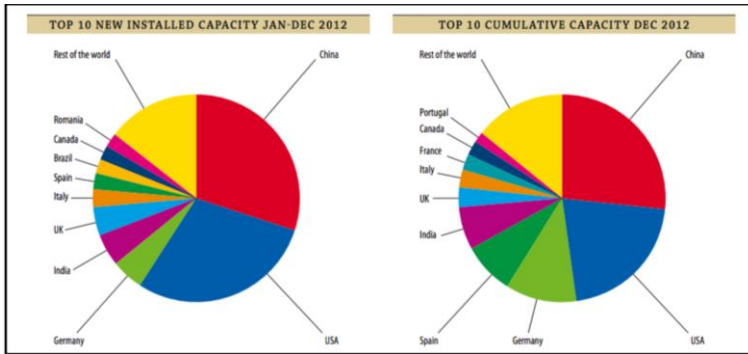
Energi angin yang dimanfaatkan saat ini hanya memenuhi 4,5% dari konsumsi energi listrik secara global. Meskipun dengan meningkat drastisnya popularitas turbin angin, namunangkitan energi listrik yang dihasilkan dari pemanfaatan energi angin hanya memenuhi sebagian kecil dari kebutuhan energi listrik global pada tahun 2030. Kelangkaan sumberdaya, meningkatnya kebutuhan energi listrik global, dan isu mengenai perubahan iklim menuntut manusia untuk meningkatkan usaha dalam menemukan energi alternatif. Salah satunya yang paling besar adalah

pemanfaatan energi dari cahaya matahari dan energi dari angin. Menurut *World and European Wind Energy Associations*, kapasitas energi angin yang dimanfaatkan menjadi energi listrik pada tahun 2010 sebesar 197 GW. Dimana 3.000 MW dari total tersebut berlokasi di lepas pantai. Bangkitan energi global yang didapat dari energi angin diestimasikan sebesar 318 GW pada tahun 2013. (REN21 2014).



Gambar 2.2 Total kapasitas bangkitan energi angin global (GWEC 2012).

China menempati posisi tertinggi dalam pemanfaatan energi angin menjadi energi listrik. Diikuti oleh Amerika Serikat, Jerman, dan Spanyol.



Gambar 2.3 Bangkitan energi angin menurut tiap negara (TECHNICA 2012).

2.1.3 *Vertical axis wind turbine*

Secara umum VAWT dikelompokkan berdasar tipe gaya yang membuatnya berputar, *drag force type* dan *lift force type*. Turbin angin Savonius merupakan tipe paling sederhana VAWT yang merupakan *drag-type*. Tipe turbin angin yang lebih kompleks yaitu Darrieus yang merupakan *lift-type* VAWT.

2.1.3.1 Turbin angin Savonius

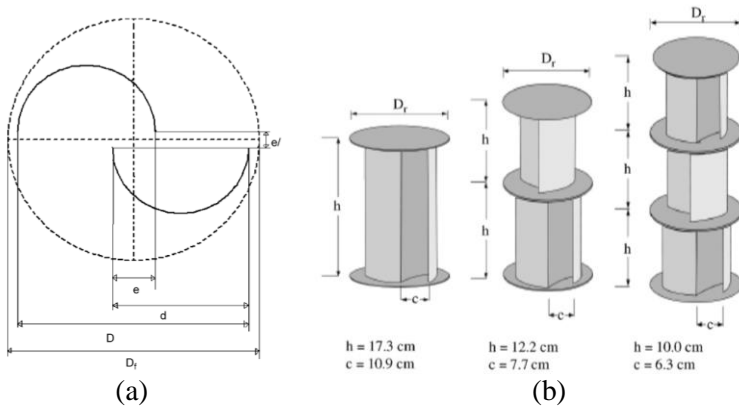
Cara kerja dari turbin angin Savonius bergantung dari perbedaan *drag force* yang bekerja pada sudu ketika aliran udara melalui bagian *concave* dan *convex*. Pemanfaatan energi yang didapat dari aliran udara dari Savonius lebih rendah daripada Darrieus. Sehingga penggunaan turbin angin Savonius umumnya tidak digunakan untuk aplikasi daya yang besar. Kelebihan paling menonjol dari turbin angin Savonius adalah kemampuannya untuk memulai pergerakannya sendiri (*self starting*).

Beberapa cara untuk mengoptimasi kinerja dari turbin angin Savonius diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Mengubah *overlap ratio*. Untuk turbin angin Savonius berjumlah dua sudu, dilakukan penelitian dengan mengubah *overlap ratio* dengan variasi 16.2%, 20%, 25%, 30% dan 35%. Ekstraksi daya maksimum didapat

dengan variasi *overlap ratio* sebesar 16,2% (Gupta, Das, et. al. 2012). Untuk turbin angin Savonius berjumlah tiga sudu, dilakukan penelitian dengan variasi *overlap ratio* sebesar 0%, 12%, dan 26%. Variasi dengan *overlap ratio* 0% (tanpa *overlap*) menghasilkan *torque coefficient* dan *power coefficient* yang lebih baik (K. N. Morshed 2010).

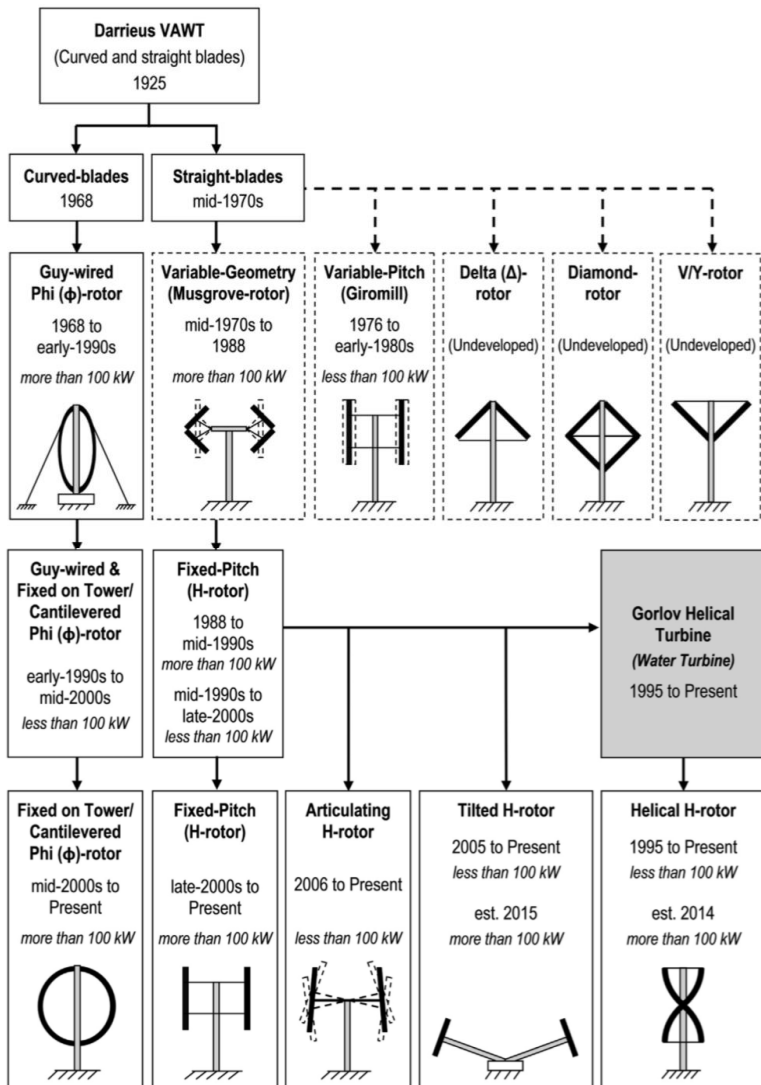
2. Mengubah bentuk dari sudu. Bentuk sudu yang melengkung memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan bentuk sudu yang datar (Qasim et. al. 2011). Bentuk sudu *semi-circular* yang datar memiliki hasil torsi dan RPM yang lebih rendah dibandingkan dengan sudu berbentuk *twisted* (Manzoor et. al. 2008).
3. Mengubah tingkat sudu. Ketika dibandingkan dengan penelitian studi eksperimen didapatkan bahwa turbin angin Savonius dengan tiga tingkat memiliki *torque coefficient* yang lebih baik daripada satu tingkat (Hayashi et. al. 2005). Penelitian lain yang menggunakan variasi turbin angin Savonius dua tingkat dan tiga tingkat. Hasil yang didapatkan bahwa turbin angin Savonius dua tingkat memiliki performa yang lebih baik daripada tiga tingkat (Saha et. al. 2008).



Gambar 2.4 (a) Overlap ratio pada turbin angin Savonius, e. (b) Variasi *stage* Savonius (Saha et. al. 2008).

2.1.3.2 Turbin angin Darrieus

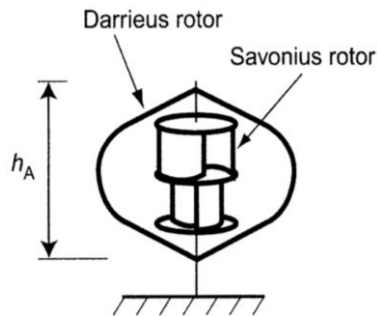
Pemanfaatan energi angin oleh turbin angin Darrieus diperoleh dari *lift force* yang bekerja pada tiap sudu searah dengan arah putaran rotor. Tipe turbin angin ini memiliki efisiensi tertinggi dibandingkan dengan tipe VAWT yang lainnya dan *tip speed ratio* yang dihasilkan lebih tinggi pada rpm yang lebih tinggi. Namun kelemahan utama dari turbin angin Darrieus adalah ketidakmampuannya untuk memulai pergerakannya sendiri sehingga perlu dorongan awal untuk memulai operasi. Cara untuk mengoptimasi performa dari turbin angin Darrieus adalah dengan mengubah jumlah sudu dan bentuk sudu.



Gambar 2.5 Variasi bentuk turbin angin Darrieus. (Tjiu et. al. 2014).

2.1.3.3 Turbin angin Darrieus-Savonius

Dengan masing-masing kelebihan yang dimiliki oleh tipe turbin angin Savonius dan Darrieus, kedua tipe ini dikombinasikan. Sehingga kelebihan kemampuan *self-starting* turbin angin Savonius bisa digunakan dan efisiensi turbin angin Darrieus yang baik bisa dimanfaatkan bersamaan. Penelitian yang dilakukan oleh Gupta et. al. 2008 membandingkan performa antara sebuah turbin angin Savonius berjumlah tiga sudu, dan dibandingkan dengan kombinasi turbin angin Savonius tiga sudu dan Darrieus tiga sudu. Turbin angin Darrieus-Savonius menghasilkan menghasilkan efisiensi sebesar 51%, lebih tinggi daripada turbin angin Savonius.



Gambar 2.6 Turbin angin Darrieus-Savonius. (Wakui T et. al. 2014).

Tabel 2.1 Tabel Perbandingan Koefisien Daya Savonius, Darrieus, dan *Hybrid*. (Kumar et. al. 2014).

C_{ps}	λ_s	C_{pd}	λ_d	C_{ph}	P (kW)
0.047	0.100	0.300	4.620	0.281	18.985
0.083	0.203	0.307	4.690	0.290	19.603
0.128	0.322	0.312	4.750	0.298	20.120
0.161	0.452	0.317	4.840	0.305	20.618
0.187	0.554	0.321	4.930	0.311	21.006
0.198	0.667	0.328	5.150	0.319	21.520
0.200	0.740	0.332	5.270	0.322	21.753
0.194	0.859	0.337	5.540	0.327	22.053
0.178	0.961	0.339	5.640	0.327	22.082
0.161	1.029	0.340	5.880	0.327	22.057
0.142	1.080	0.337	6.390	0.323	21.775
0.117	1.147	0.332	6.610	0.316	21.317
0.092	1.187	0.329	6.770	0.311	21.007
0.063	1.238	0.322	6.820	0.303	20.459
0.033	1.260	0.320	6.880	0.299	20.162

Pada tabel 2.1 C_{ps} adalah nilai dari koefisien daya yang dimiliki oleh turbin angin Savonius. Notasi λ_s merupakan *tip speed ratio* dari turbin angin Savonius. Notasi C_{pd} adalah nilai dari koefisien daya yang dimiliki oleh turbin angin Darrieus. Notasi λ_d merupakan *tip speed ratio* dari turbin angin Darrieus. Notasi C_{ph} adalah nilai dari koefisien daya yang dimiliki oleh turbin angin *hybrid* Darrieus-Savonius. Sedangkan P merupakan daya yang dihasilkan oleh turbin angin *hybrid* Darrieus-Savonius.

2.1.4 Koefisien daya

Secara umum konversi energi dalam bentuk apapun tidaklah dapat mencapai efisiensi seratus persen. Koefisien daya merupakan salah satu parameter yang digunakan dalam menganalisis performa dari turbin angin. Koefisien daya juga bisa berarti efisiensi kemampuan turbin angin untuk menyerap energi

kinetik angin yang melewati penampang turbin angin. Efisiensi turbin angin adalah perbandingan antara energi kinetik yang diserap oleh turbin angin terhadap energi kinetik angin yang tersedia. Nilai koefisien daya maksimum secara teoritis ditunjukkan menggunakan teori Betz yang bernilai 59,26% atau disebut dengan Betz *limit*. Nilai dari koefisien daya yang mendefinisikan kemampuan turbin angin dalam mengkonversi energi angin didapatkan dengan rumusan matematis berikut.

$$C_P = \frac{\text{extracted energy}}{\text{wind kinetic energy}} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A v^3} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A v^3} = \lambda C_{Qr}$$

dimana,

C_P = koefisien daya total turbin

C_{Qr} = koefisien torsi total

λ = *tip speed ratio*

2.1.5 *Tip speed ratio*

Tip speed ratio merupakan perbandingan antara kecepatan putaran turbin dengan kecepatan angin yang melewati turbin. Secara matematis *tip speed ratio* didefinisikan sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\omega r}{v}$$

dimana,

λ = *tip speed ratio*

u = kecepatan turbin (m/s)

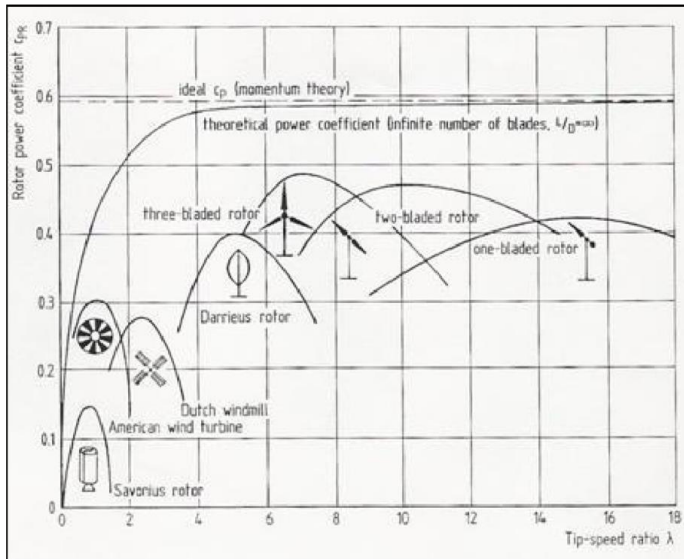
v = kecepatan angin (m/s)

ω = kecepatan putaran turbin (rad/s)

r = jari-jari rotor maksimum (m)

Setiap konstruksi turbin yang berbeda menyebabkan adanya perbedaan karakteristik aliran yang melewati turbin. Hal ini juga menyebabkan perbedaan hasil *tip speed ratio* yang terjadi pada turbin. Sedangkan *tip speed ratio* adalah parameter yang mempengaruhi nilai dari koefisien daya. Pengaruh dari bentuk

konstruksi turbin angin dan *tip speed ratio* terhadap nilai koefisien daya ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Grafik koefisien daya dibandingkan dengan *tip speed ratio* untuk variasi *wind turbine* (HAU 2006).

2.1.6 Time step

Perhitungan *time step* dilakukan untuk mengetahui berapa besarnya *time step* dalam satu putaran penuh. Secara matematis nilai dari *time step* didapat dari perumusan berikut.

$$\omega = \frac{\theta - \theta_0}{t}$$

Dimana,

ω = kecepatan sudut (rad/s)

θ = sudut satu putaran

θ_0 = sudut nol putaran

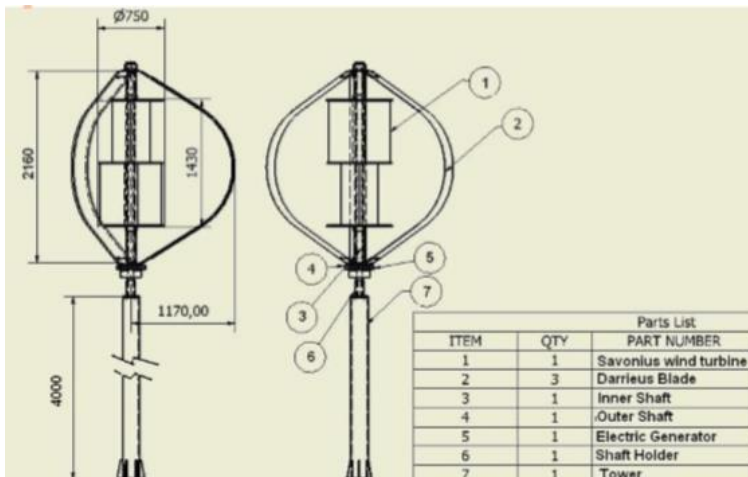
t = waktu tempuh satu putaran (s)

$$time\ step = \frac{waktu\ satu\ putaran}{jumlah\ frame}$$

2.2 Tinjauan Pustaka

2.2.1 Dwiyantoro et. al. (2015)

Dwiyantoro et. al. (2015) melakukan studi eksperimen pada *Vertical Axis Wind Turbine* dengan tipe Savonius *dual-stage* dengan masing-masing *stage* memiliki dua sudu Savonius dikombinasikan dengan turbin angin tipe Darrieus *eggbeater* dengan jumlah sudu sebanyak tiga buah sudu. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pola aliran dan bangkitan daya yang mampu dihasilkan oleh turbin angin ini.



Gambar 2.8 Layout Turbin Angin Darrieus-Savonius
(Dwiyantoro et. al. 2015).

Gambar 2.8 menunjukkan konfigurasi dari turbin angin dengan peletakan turbin angin tipe Savonius dan Darrieus berada pada sumbu aksial yang sama. Peletakan turbin angin Savonius diletakkan di tengah turbin angin Darrieus sehingga seolah-olah turbin angin Savonius berada di dalam turbin angin Darrieus.

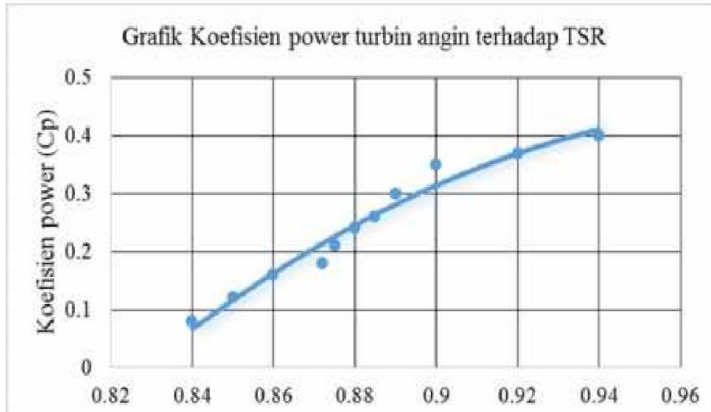
Keuntungan yang didapatkan dari konfigurasi turbin angin ini adalah dapat mengkonversi berbagai macam aliran angin dan yang datang dari arah manapun. Turbin angin Darrieus-Savonius ini memiliki tinggi 2,16 meter dan diameter 2,34 m. Turbin angin Darrieus memiliki tiga buah sudu berbentuk airfoil simetri dengan panjang *chord* 10 cm. Turbin angin Savonius memiliki total sejumlah empat buah sudu berbentuk setengah lingkaran. Keseluruhan konstruksi turbin angin memiliki ketinggian 4 m dari permukaan tanah dengan diameter 14 cm dengan ketebalan 0,8 cm.



Gambar 2.9 Grafik hubungan antara putaran turbin angin terhadap kecepatan angin (Dwiyantoro et. al. 2015).

Gambar 2.9 menunjukkan grafik hubungan putaran turbin angin yang terjadi dibandingkan dengan kecepatan angin yang melalui turbin angin Darrieus-Savonius. Turbin angin mulai menghasilkan daya pada kecepatan angin di *wind tunnel* 7,5 m/s dengan putaran turbin 742 rpm. Grafik menunjukkan semakin besar kecepatan angin yang mengenai sudu turbin angin maka putaran yang dihasilkan semakin besar pula. Hal ini disebabkan energi yang dimiliki oleh angin semakin besar seiring dengan

semakin besarnya kecepatan angin yang terjadi sehingga dapat menghasilkan putaran turbin yang semakin tinggi.



Gambar 2.10 Grafik hubungan antara koefisien daya turbin angin model terhadap TSR (Dwiyantoro et. al. 2015).

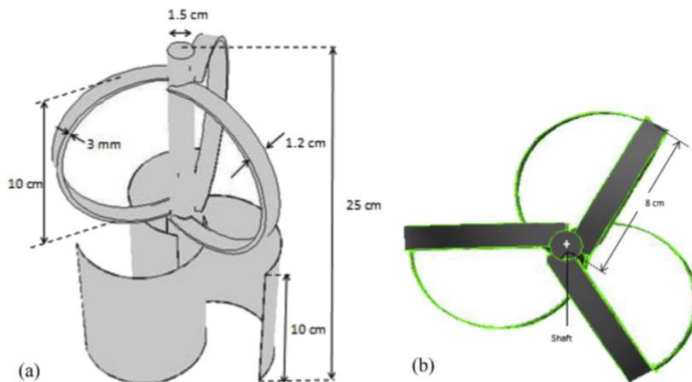
Gambar 2.10 menunjukkan koefisien daya turbin angin meningkat seiring dengan meningkatnya *tip speed ratio*. Hal ini disebabkan karena *tip speed ratio* dipengaruhi oleh kecepatan angin yang mengenai sudu turbin angin, di mana semakin besar kecepatan angin maka nilai dari *tip speed ratio* yang dihasilkan semakin besar pula. Turbin angin memiliki koefisien daya maksimum pada nilai *tip speed ratio* 0,95 sebesar 42%. Hasil eksperimen untuk mengetahui karakteristik turbin angin Darrieus-Savonius menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan angin, maka energi yang dihasilkan semakin besar, oleh sebab itu koefisien daya dari turbin angin Darrieus-Savonius semakin meningkat. Desain turbin angin ini mampu menghasilkan daya 500 Watt pada kecepatan angin 7,5 m/s.

2.2.2 Ghosh et. al. (2015)

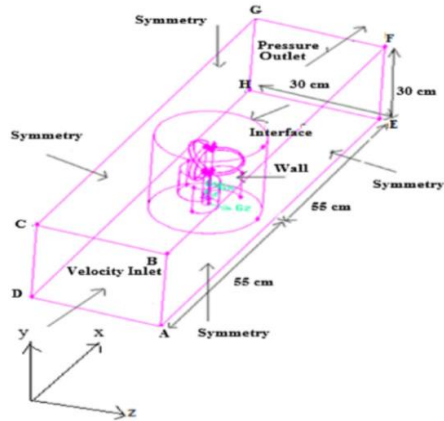
Ghosh melakukan studi numerik dengan menggunakan *software* Fluent 6.0 pada turbin angin Savonius berjumlah tiga sudu yang dikombinasikan dengan Darrieus berjumlah tiga sudu. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan hasil studi numerik terhadap hasil studi eksperimen pada permodelan turbin angin yang serupa yang dilakukan oleh Gusta et. al. 2006.

Konstruksi dari kombinasi tersebut adalah turbin angin Darrieus diletakkan di atas turbin angin Savonius. Pada penelitian ini parameter yang divariasikan adalah nilai *overlap ratio* dari turbin angin tipe Savonius. *Overlap ratio* didefinisikan sebagai jarak dari sisi terdalam dari sudu turbin angin Savonius hingga titik pusat rotasi. Variasi *overlap ratio* yang digunakan adalah 16,2% - 25%. yang didapatkan dengan mengubah diameter keseluruhan dari rotor turbin angin Savonius.

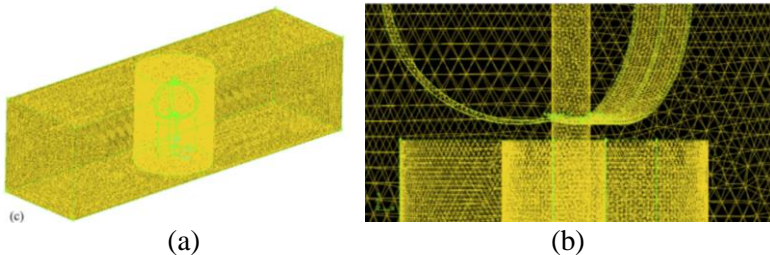
Turbin angin Darrieus memiliki *chord length* sebesar 1,2 cm, *chord width* 3 mm, dan tinggi keseluruhan 10 cm. Sedangkan turbin angin Savonius memiliki tebal sudu 3mm, jari-jari sudu 8 cm, dan tinggi keseluruhan 10 cm. Geometri dari permodelan ini ditunjukkan pada Gambar 2.11. *Domain* dan *boundary conditions* dari permodelan ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.11 Geometri turbin angin Darrieus-Savonius. (Ghosh et. al. 2015).



Gambar 2.12 *Domain dan boundary conditions* turbin angin Darrieus-Savonius. (Ghosh et. al. 2015).

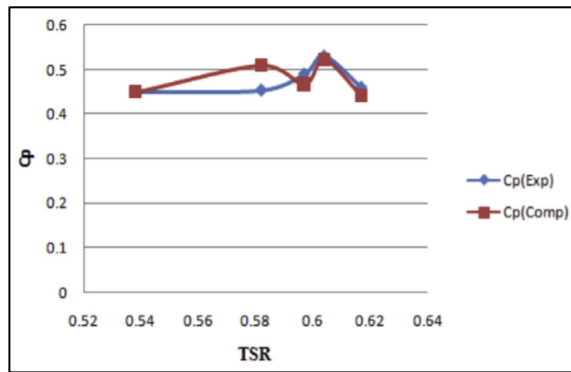


Gambar 2.13 (a) *Meshing* untuk simulasi permodelan. (b) *Meshing* di sekitar turbin angin untuk simulasi permodelan. (Ghosh et. al. 2015).

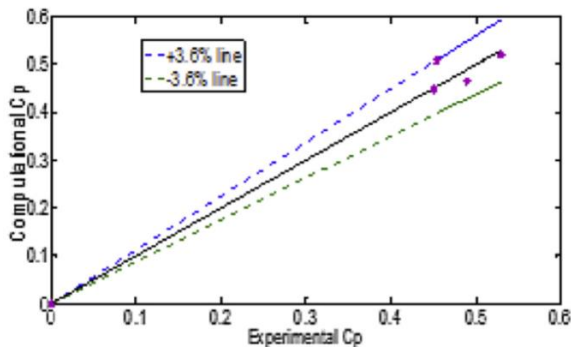
Tipe *mesh* yang digunakan adalah *grid* dengan total 2.728.017 *nodes*. Permodelan disimulasikan dengan *realizable k-ε turbulence model* dengan kondisi *steady state incompressible flow*.

Dari studi numerik ini didapatkan grafik hubungan antara C_p dengan *tip speed ratio* dan dibandingkan dengan hasil pada studi eksperimen. Grafik perbandingan C_p dengan TSR antara studi numerik dengan studi eksperimen untuk permodelan dengan

variasi *overlap ratio* sebesar 16,8% dapat dilihat pada Gambar 2.14. Grafik perbandingan C_p antara studi numerik dengan studi eksperimen dapat dilihat pada Gambar 2.15. Dari kedua grafik tersebut dapat dilihat terdapat perbedaan antara hasil yang didapatkan dari studi numerik dan yang didapatkan dari studi eksperimen.



Gambar 2.14 Grafik perbandingan C_p dengan TSR untuk turbin angin Darrieus-Savonius dengan variasi *overlap ratio* 16,8%. (Ghosh et. al. 2015).

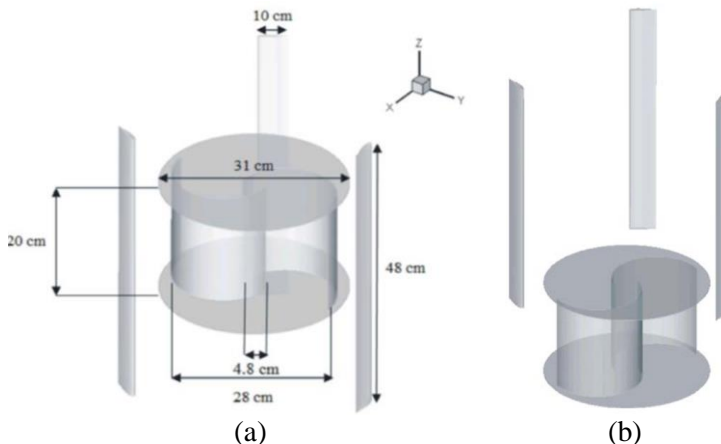


Gambar 2.15 Grafik perbandingan C_p hasil studi numerik dengan C_p hasil studi eksperimen untuk turbin angin Darrieus-Savonius dengan variasi *overlap ratio* 16,8%. (Ghosh et. al. 2015).

2.2.3 Rassoulinejad-Mousavi et. al. (2013)

Rassoulinejad-Mousavi et. al. melakukan studi eksperimen terhadap turbin angin Darrieus-Savonius. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh konstruksi turbin angin Savonius sejumlah dua sudu yang dikombinasikan dengan turbin angin Darrieus. Konstruksi turbin angin Savonius yang diletakkan di tengah turbin angin Darrieus h-rotor dibandingkan dengan turbin angin Savonius yang diletakkan di bawah turbin angin Darrieus.

Turbin angin Darrieus h-rotor sejumlah tiga sudu memiliki *chord length* sebesar 10 cm dan tinggi sudu sebesar 48 cm. Turbin angin Savonius sejumlah dua sudu memiliki diameter 28 cm, *overlap ratio* sebesar 0.16, dan tinggi 20 cm. Geometri kombinasi turbin angin Savonius yang diletakkan di tengah turbin angin Darrieus h-rotor ditunjukkan pada Gambar 2.16(a). Geometri kombinasi turbin angin Savonius yang diletakkan di bawah turbin angin Darrieus h-rotor ditunjukkan pada Gambar 2.16(b).

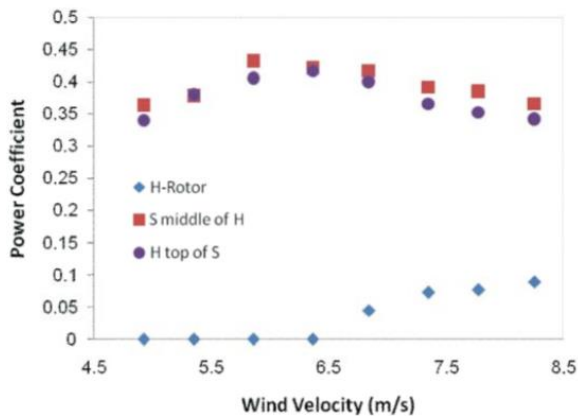


Gambar 2.16 (a) Turbin angin Savonius di tengah Darrieus h-rotor. (b) Turbin angin Savonius di bawah Darrieus h-rotor.

(Rassoulinejad-Mousavi et. al. 2013).

Penelitian eksperimen ini menggunakan *wind tunnel subsonic* dengan variasi kecepatan angin sebesar 5 m/s, 5,5 m/s, 6 m/s, 6,5 m/s, 7 m/s, 7,5 m/s, 8 m/s, dan 8,5 m/s. Turbin angin diletakkan di luar bagian dari *windtunnel*.

Hasil dari penelitian ini didapatkan nilai C_p yang ditunjukkan pada Gambar 2.17. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa rata-rata C_p yang dihasilkan oleh kombinasi turbin angin Savonius yang diletakkan di tengah turbin angin Darrieus lebih baik dibandingkan dengan kombinasi turbin angin Savonius yang diletakkan di bawah turbin angin Darrieus.



Gambar 2.17 Grafik Kecepatan angin dengan C_p . (Rassoulinejad-Mousavi et. al. 2013).

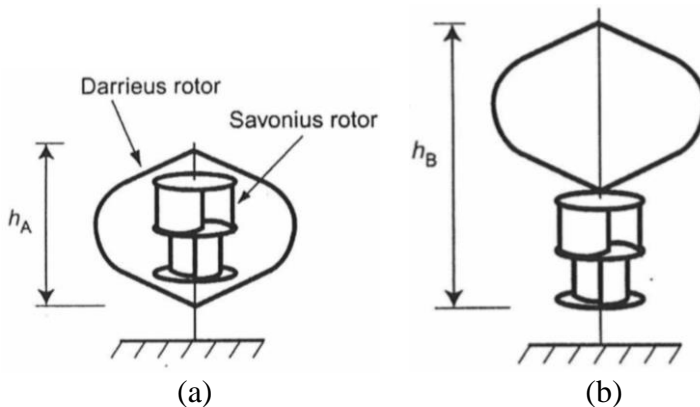
2.2.4 Wakui et. al. (2014)

Pada tahun 2014 Wakui et. al. mengembangkan dua tipe turbin angin konfigurasi turbin angin Darrieus *eggbeater* dengan Savonius *dual-stage*. Studi numerik dengan membuat dua tipe turbin angin, tipe A dan tipe B. Tipe A turbin angin Savonius diletakkan ditengah turbin angin Darrieus. Desain dari turbin angin *hybrid* ini menjadi sulit dikarenakan beban yang diterima oleh Savonius yang dihasilkan oleh Darrieus pada koefisien daya maksimum, dan Darrieus menerima efek *wake* dari Savonius.

Sedangkan tipe B turbin angin Darrieus diletakkan di atas turbin angin Savonius. Data konfigurasi turbin angin ditampilkan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Data Konfigurasi Turbin Angin (Wakui T et. al. 2014).

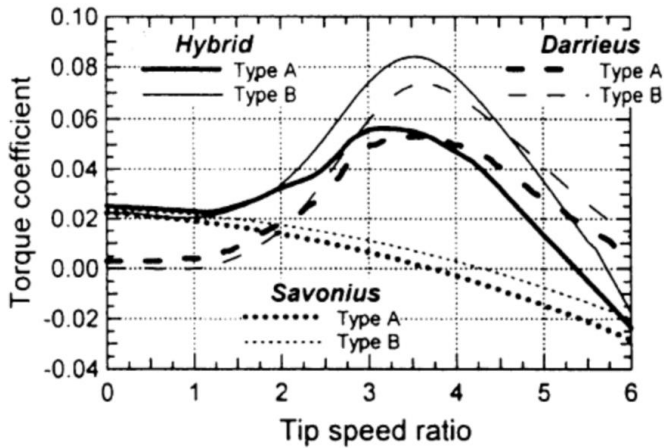
Item		Type A	Type B
Rated power output	kW	0.3	0.45
Rated wind speed	m/s	10	10
Darrieus rotor diameter	m	2.0	2.0
Savonius rotor diameter	m	0.6	0.6
Rotor height	m	1.6	2.8
Rotational inertia	kgm ²	2.80	3.05



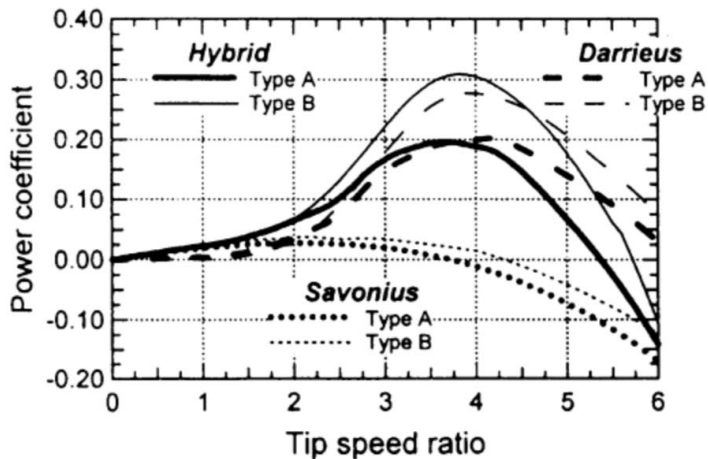
Gambar 2.18 (a) Turbin angin tipe A. (b) Turbin angin tipe B.
(Wakui T et. al. 2014).

Turbin angin tipe A memiliki koefisien daya tertinggi sebesar 0,204 pada *tip speed ratio* sebesar 3,51. Dikarenakan adanya *wake effects* oleh turbin angin Savonius, pada daerah *tip speed ratio* tinggi konfigurasi tipe A ini lebih buruk jika dibandingkan dengan turbin angin Darrieus. Namun lebih baik pada *tip speed ratio* yang rendah. Turbin angin tipe B memiliki

nilai koefisien daya yang lebih besar yaitu 0,231 pada *tip speed ratio* sebesar 3,76. Turbin angin tipe B ini memiliki skala model yang lebih besar jika dibandingkan dengan tipe B.



Gambar 2.19 Grafik perbandingan koefisien torsi terhadap *tip speed ratio*. (Wakui T et. al. 2014).



Gambar 2.20 Grafik perbandingan koefisien daya terhadap *tip speed ratio*. (Wakui T et. al. 2014).

Dikarenakan turbin angin tipe B memiliki skala yang lebih besar jika dibandingkan dengan tipe A, hal ini menjadikan tipe A lebih kokoh dalam konstruksi. Turbin angin tipe B tidak menghasilkan performa yang bagus jika digunakan dalam skala yang besar. Sehingga dikarenakan konfigurasi tipe A memiliki performa turbin yang baik dan kekokohan konstruksi, maka Wakui T et. al. menyarankan untuk menggunakan turbin angin tipe A daripada tipe B.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Variasi dan Domain Simulasi

3.1.1 Variasi

Penelitian dengan metode numerik ini dilakukan menggunakan *software* STAR-CCM+ 9.02.007-R8. Studi numerik memiliki tiga tahapan utama yaitu *Pre Processing*, *Processing*, dan *Post Processing*. Permodelan pada penelitian ini divariasikan berdasarkan konfigurasi peletakan turbin angin Savonius dan Darrieus, dan berdasarkan pada kecepatan angin. Nilai dari kecepatan sudut turbin didapatkan dari hasil ekstrapolasi hasil eksperimen yang dilakukan oleh Dwiyantoro et. al. Variasi permodelan studi numerik ini dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variasi Penelitian.

Parameter	Variasi		
Konfigurasi turbin angin	Savonius di tengah Darrieus dan Savonius di bawah Darrieus.		
Putaran turbin angin	Setiap 5°		
Kecepatan angin (m/s)	5	10	15
Kecepatan sudut turbin (rpm)	440	949	1500
<i>Tip speed ratio</i>	1,08	1,16	1,28

3.1.2 Domain simulasi

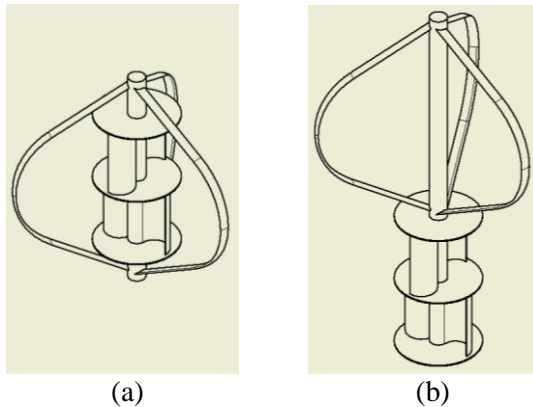
Kondisi yang digunakan dalam studi numerik sebisa mungkin disesuaikan dengan keadaan nyata di lapangan. Pada penelitian ini domain dari permodelan dibagi menjadi dua jenis, yaitu *static domain* dan *rotating domain*. *Static domain* merupakan daerah terluar dari permodelan, daerah ini statis tidak bergerak. *Static domain* berada disekeliling *rotating domain*

dengan bentuk persegi panjang. *Rotating domain* merupakan domain yang bergerak secara rotasi terhadap sumbu y. *Rotating domain* berbentuk silinder yang melingkupi semua bagian dari turbin angin. *Rotating domain* ini diperlakukan sebagai *rotation motion* dimana putaran *rotatin domain* sama dengan putaran turbin angin yang berputar dengan kecepatan dan *time step* tertentu.

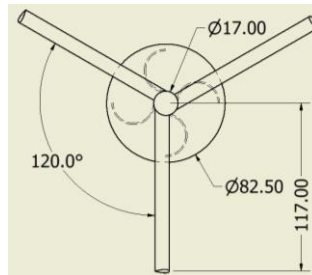
3.2 Tahap Pre Processing

3.2.1 Pembuatan geometri dan *meshing*

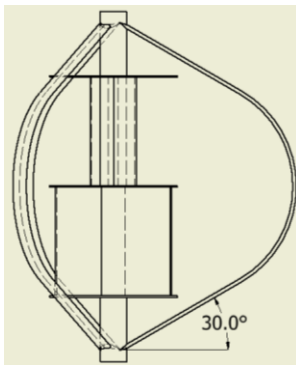
Pembuatan geometri merupakan tahapan pembuatan turbin angin yang akan disimulasikan dibentuk menyerupai dengan aslinya. Untuk pembuatan model turbin angin dibuat berdasar variasi konfigurasi peletakan turbin angin Darrieus-Savonius. Pada Gambar 3.1 menunjukkan model turbin angin yang dibuat, tipe A adalah konfigurasi rotor Savonius yang diletakkan di tengah rotor Darrieus, sedangkan tipe B adalah konfigurasi rotor Savonius yang diletakkan di bawah rotor Darrieus. Gambar 3.2, Gambar 3.3, dan Gambar 3.4 menampilkan Gambar teknik dari kedua model turbin angin dan bentuk dari sudu turbin Savonius dan Darrieus dalam satuan milimeter (mm).



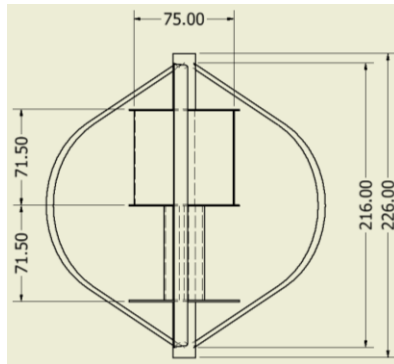
Gambar 3.1 (a) Konfigurasi tipe A. (b) Konfigurasi tipe B.



(a)

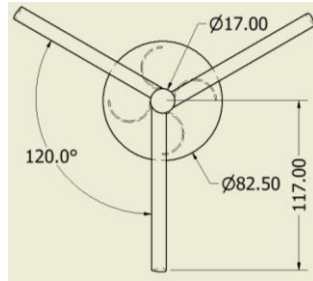


(b)

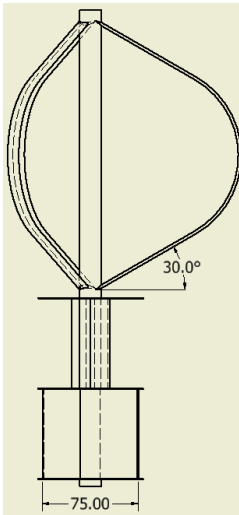


(c)

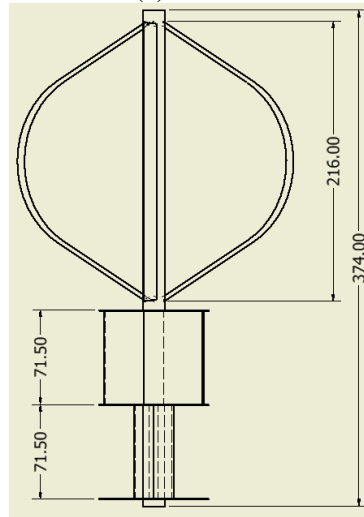
Gambar 3.2 Gambar teknik konfigurasi tipe A. (a) Tampak atas. (b) Tampak samping. (c) Tampak depan.



(a)

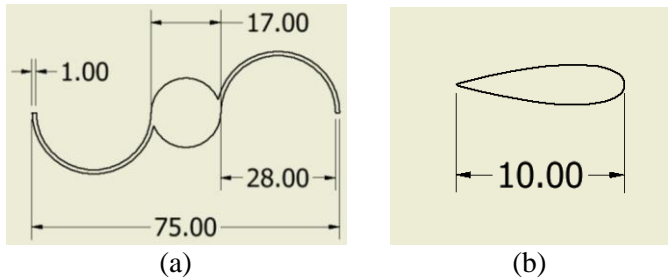


(b)



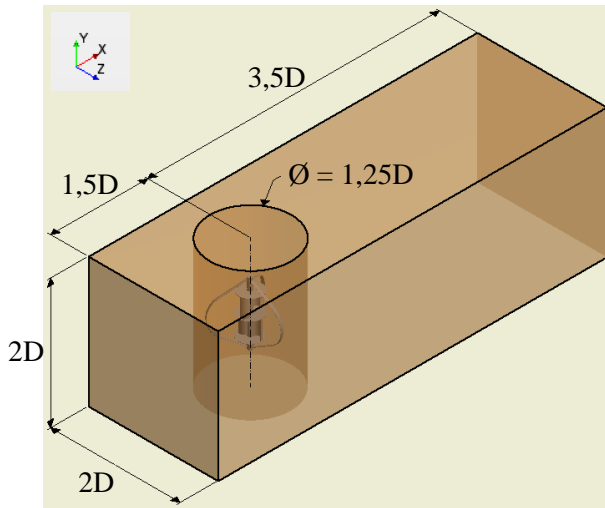
(c)

Gambar 3.3 Gambar teknik konfigurasi tipe B. (a) Tampak atas. (b) Tampak samping. (c) Tampak depan.

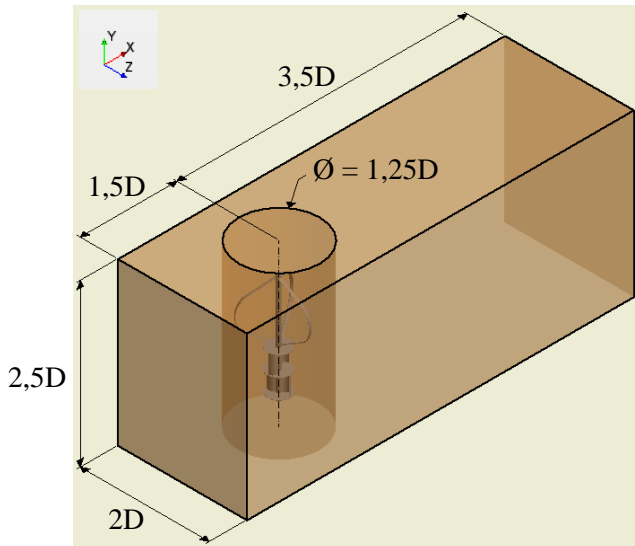


Gambar 3.4 (a) Sudu Savonius dua sudu. (b) Sudu Darrieus *symmetry* NACA0024.

Tahapan berikutnya adalah pembuatan geometri dari domain. Untuk *static domain* dibuat berbentuk persegi panjang dengan panjang 5 D, lebar 2 D, dan tinggi 2 D untuk tipe A dan tinggi 2,5 D untuk tipe B. Sedangkan untuk *rotating domain* berbentuk silinder dengan posisi titik pusat silinder berada pada 1,5 D dari *inlet region* dan 1 D dari tiap sisi *symmetry plane region*. Silinder untuk *rotating domain* memiliki diameter 1,25 D, tinggi 2 D untuk tipe A dan tinggi 2,5 D untuk tipe B. Untuk *rotating domain* merupakan silinder yang telah di-subtract dengan turbin angin. D merupakan jari-jari dari rotor Darrieus yaitu sebesar 234 mm.

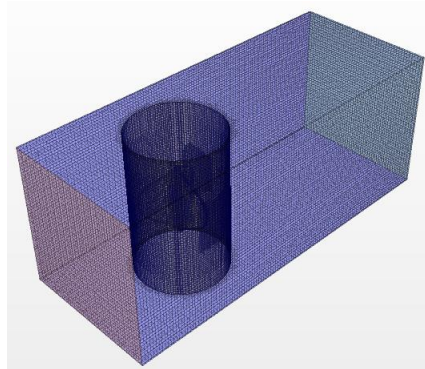


Gambar 3.5 Dimensi permodelan konfigurasi tipe A.

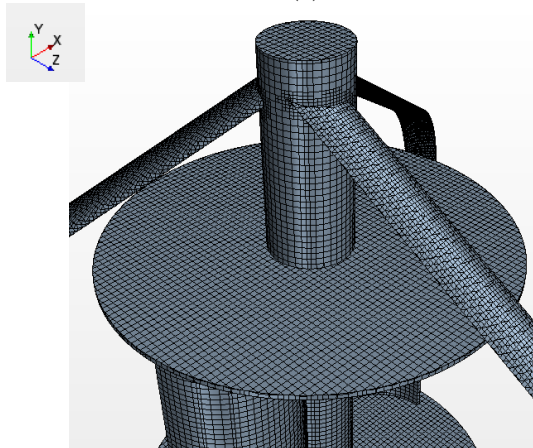


Gambar 3.6 Dimensi permodelan konfigurasi tipe B.

Pembuatan *meshing* dilakukan untuk membagi geometri permodelan baik permukaan turbin angin dan *domain* menjadi bagian kecil untuk pengaplikasian parameter yang telah ditentukan. Metode *meshing* yang dipilih adalah *unstructured mesh* dikarenakan bentuk geometri yang kompleks dan digunakan bentuk *tetrahedral mesh*.

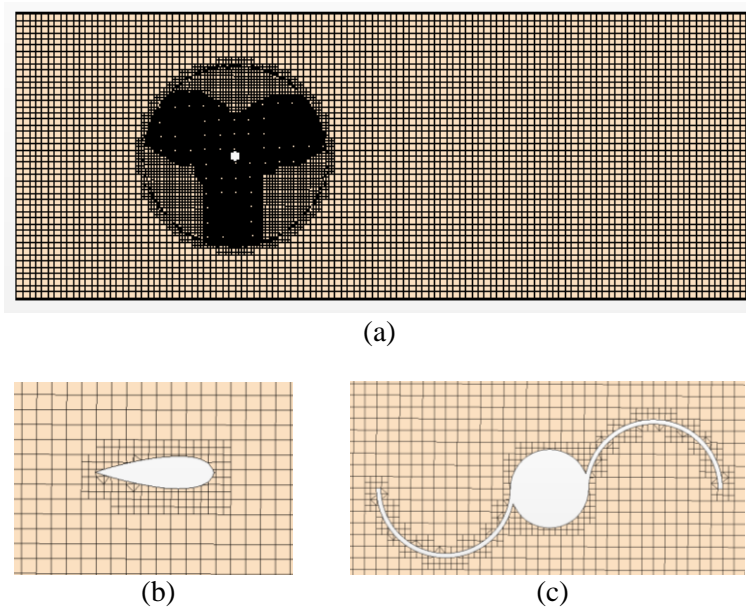


(a)



(b)

Gambar 3.7 *Meshing* (a) *Volume mesh* permodelan simulasi. (b) *Mesh* di permukaan turbin angin.

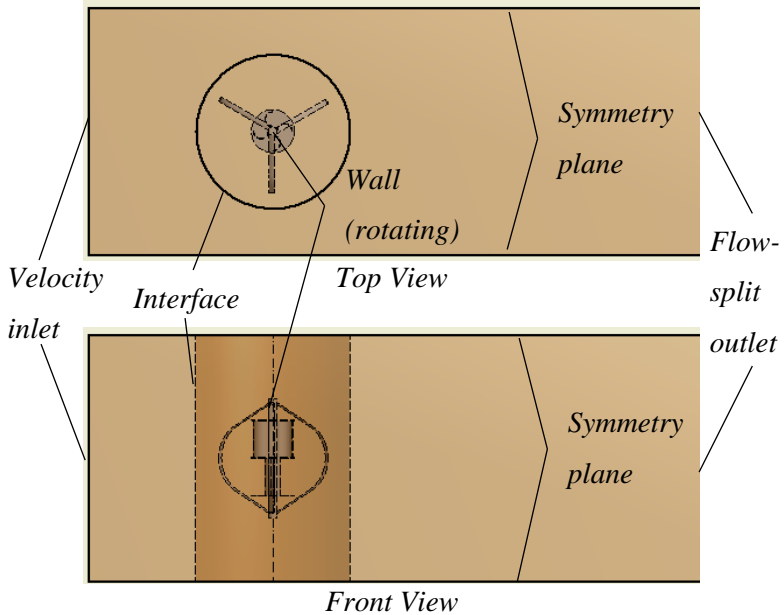


Gambar 3.8 (a) *Meshing* pada penampang xz konfigurasi tipe A. (b) *Meshing* di sekitar sudu Darrieus. (c) *Meshing* di sekitar sudu Savonius.

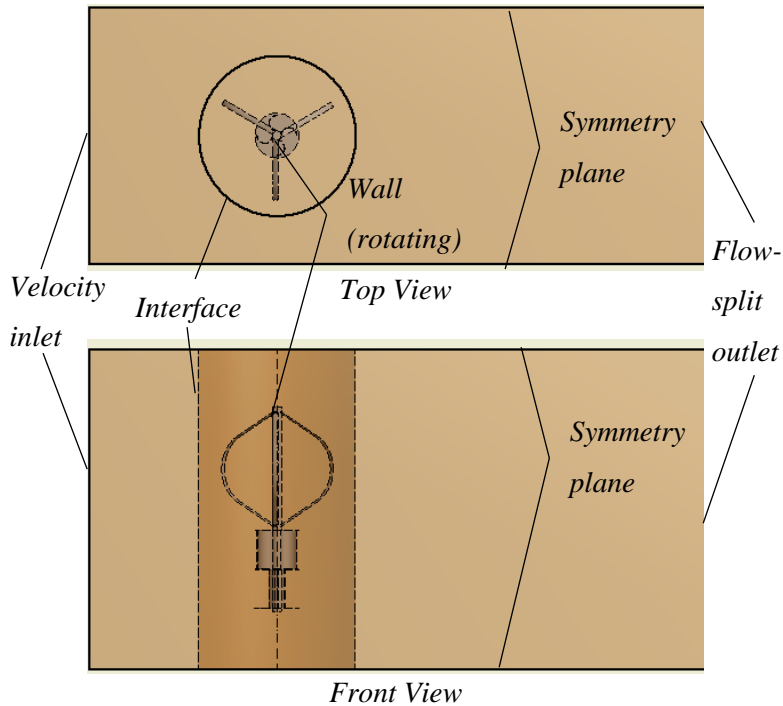
3.2.2 *Boundary conditions*

Setiap sisi dari geometri yang telah dibentuk perlu untuk didefinisikan kondisi perlakuan sisi tersebut di dalam penelitian. *Boundary conditions* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *inlet region*, *outlet region*, *symmetry plane*, *interface*, dan *wall*. *Inlet region* didefinisikan sebagai *velocity inlet* yang memiliki nilai kecepatan aliran 5, 10, dan 15 m/s. Pada *outlet region* didefinisikan sebagai *flow-split outlet*. Pada bagian sisi kanan, kiri, atas, dan bawah turbin angin didefinisikan sebagai *symmetry plane* sehingga sisi ini tidak mempengaruhi kondisi dari aliran. *Interface* dibentuk dari pertemuan dua *domain* yaitu sisi selimut silinder yang merupakan bagian dari *rotating domain* dan sisi selimut dalam dari *static domain* sehingga aliran bisa melewati

dua *domain* tanpa mempengaruhi karakteristik aliran. Sedangkan untuk turbin angin didefinisikan sebagai *wall*.



Gambar 3.9 *Boundary conditions* untuk konfigurasi tipe A.



Gambar 3.10 *Boundary conditions* untuk konfigurasi tipe B.

3.2.3 Parameter

3.2.3.1 Models

Permodelan yang digunakan dalam penelitian numerik ini menggunakan *three dimensional space*. Fluida kerja aliran adalah udara dengan kondisi *constant density*. *Segregated flow* dengan *k-omega SST turbulence model*, di mana model ini dipilih karena memiliki cakupan aplikasi yang luas dan umum digunakan. *Implicit unsteady* dipilih dengan skema diskritisasi *second order upwind* dengan nilai *time step*, *turbulence intensity*, dan *length scale* yang ditentukan dari kecepatan putar turbin. *Inner iteration* yang digunakan adalah sebesar 100 iterasi.

3.2.3.2 *Materials*

Fluida kerja yang dipilih adalah udara dengan density 1,18415 kg/m³ (*constant*) dan *dynamic viscosity* 1.85508E-5 Pa.s (*constant*).

3.2.3.3 *Rotating motion*

Bagian *rotating domain* yang merupakan bagian silinder yang telah di-*subtract* dengan bentuk turbin. Pengaturan *rotation motion* dilakukan dengan membuat permodelan pada *Motion Manager* pada *subnodes Tools* pada *software STAR-CCM+* 9.02.007-R8. Pada *nodes Motion* terdapat *subnodes rotation* dimana akan diatur kondisi dari *rotation motion*. Sumbu putar dari *rotation motion* adalah sumbu y dan titik pusat *rotation motion* adalah pada titik tengah dari turbin angin. Setelah mengaktifkan *rotation motion* selanjutnya pada *nodes Region* dan pada *subnodes rotating domain* pada bagian *physic values-motion specification* diubah dari *stationery* menjadi *rotation*.

3.3 Tahap *Processing*

Pada tahap *processing*, parameter yang telah diatur pada tahap *pre processing* akan diiterasi hingga mencapai kriteria konvergensi yang diinginkan. Kriteria konvergensi yang digunakan adalah saat nilai residual mencapai 10^{-5} . Jika kriteria konvergensi telah tercapai, maka langkah selanjutnya adalah tahap *post processing* dan apabila kriteria konvergensi tidak tercapai maka langkah kembali ke tahap pembuatan geometri dan *meshing*.

3.4 Tahap *Post Processing*

Tahap *post processing* adalah tahapan untuk menganalisa dan visualisasi dari hasil permodelan numerik. Pada tahap *post processing* akan didapatkan kontur aliran udara yang ditunjukkan dengan kontur kecepatan dan kontur tekanan. Pada tahap ini juga akan didapatkan hasil berupa grafik torsi yang didapatkan dari hasil simulasi dan nilai koefisien daya terhadap *tip speed ratio*

yang didapatkan dari perhitungan sehingga dapat diambil kesimpulan konfigurasi peletakan rotor Savonius dan rotor Darrieus manakah yang menghasilkan koefisien daya yang lebih baik.

3.5 Contoh Perhitungan

Berikut ini adalah contoh perhitungan untuk nilai *time step*, *tip speed ratio*, dan koefisien daya turbin angin Darrieus-Savonius pada kondisi kecepatan angin sebesar 15 m/s dan kecepatan putar turbin sebesar 1500 rpm. Data yang didapatkan dari permodelan dengan kondisi tersebut untuk konfigurasi tipe A didapatkan nilai torsi total sebesar 0.0155 N.m.

3.5.1 Perhitungan *time step*

$$\omega = \frac{\theta - \theta_0}{t}$$

$$t = \frac{\theta - \theta_0}{\omega}$$

$$t = \frac{2\pi - 0}{157 \frac{rad}{s}}$$

$$t = 0,04 \text{ s}$$

Pengambilan data setiap 5° sehingga jumlah frame sejumlah 72.

$$time \text{ step} = \frac{waktu \text{ satu putaran}}{jumlah \text{ frame}}$$

$$time \text{ step} = \frac{0,04 \text{ s}}{72}$$

$$time\ step = 0,00056\ s$$

3.5.2 Perhitungan *tip speed ratio*

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\omega r}{v}$$

$$\lambda = \frac{157 \frac{rad}{s} \times 0,117\ m}{15 \frac{m}{s}}$$

$$\lambda = 1,28$$

3.5.3 Perhitungan koefisien daya

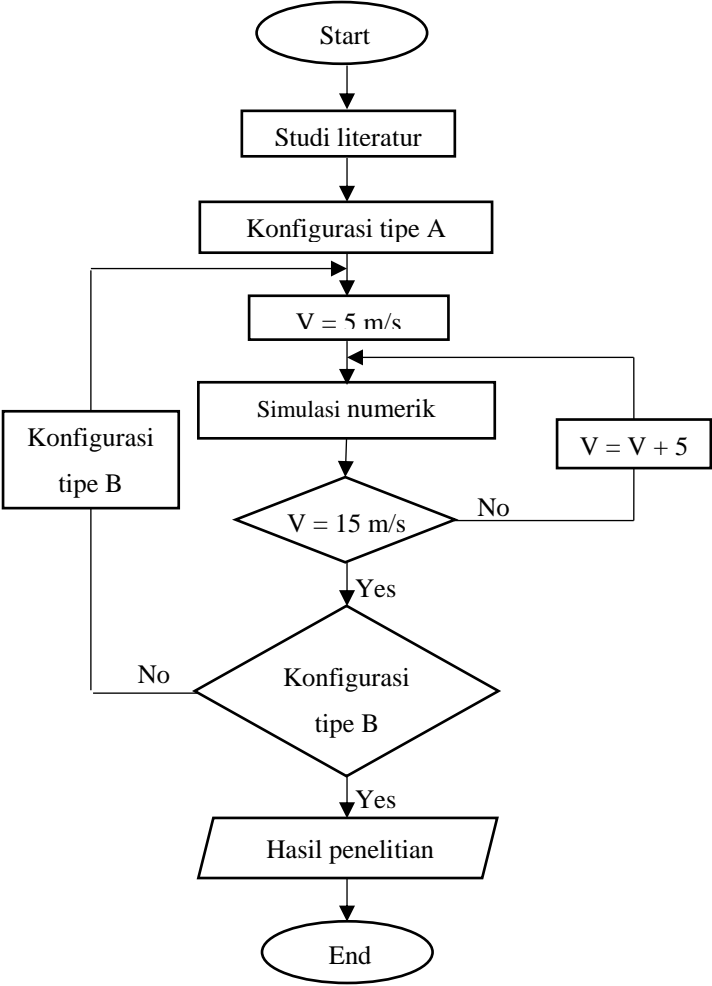
$$C_p = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A v^3}$$

$$C_p = \frac{0,0155\ N.m \times 157 \frac{rad}{s}}{\frac{1}{2} \times 1,18415 \frac{kg}{m^3} \times 0,0352\ m^2 \times (15 \frac{m}{s})^3}$$

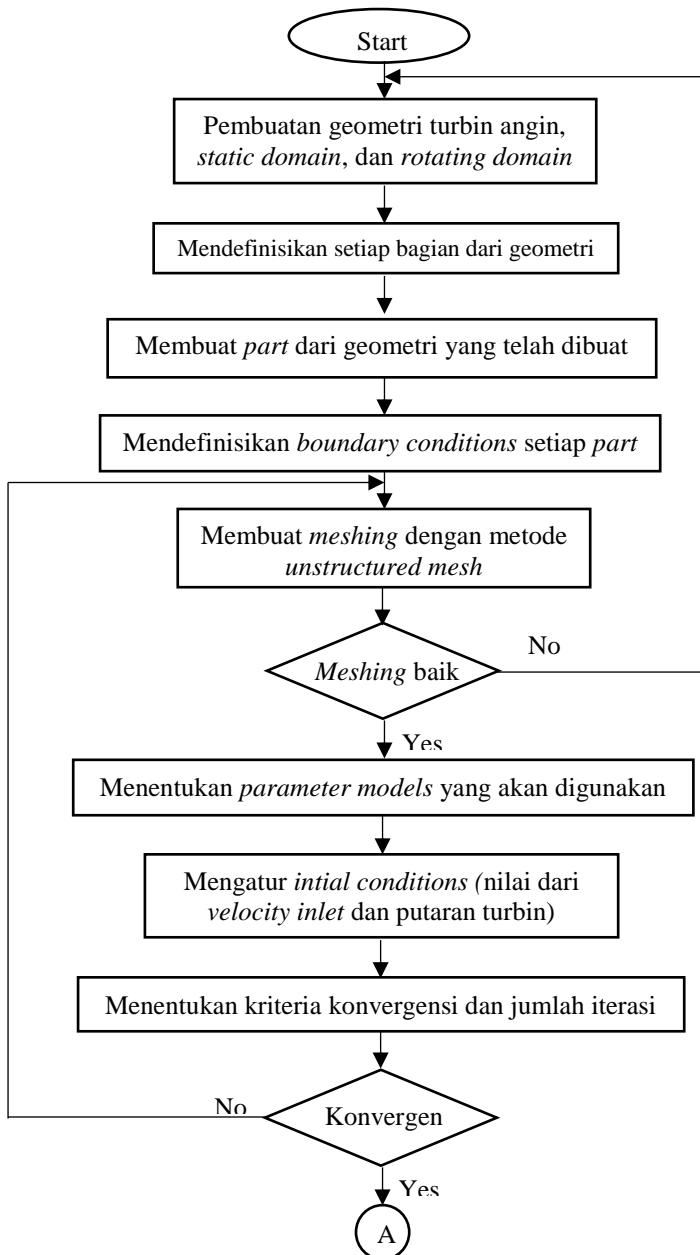
$$C_p = 0,033$$

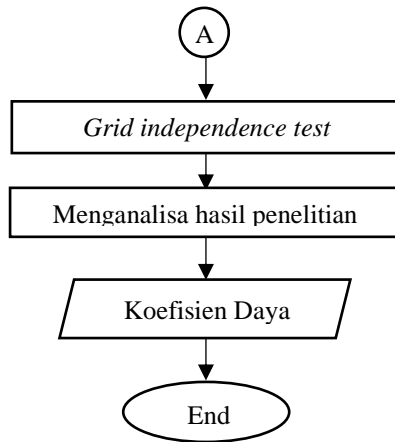
3.6 *Flowchart* Penelitian

Pada penelitian ini terdapat langkah-langkah terstruktur yang ditunjukkan dalam *flowchart* penelitian umum dan *flowchart* penelitian numerik sebagai berikut :



Gambar 3.11 *Flowchart* umum penelitian.





Gambar 3.12 *Flowchart* simulasi numerik.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Permodelan

Dalam studi numerik ini setelah dilakukan perhitungan terhadap *tip speed ratio*, kecepatan putar, dan *time step*, berikut ini adalah data yang digunakan dalam studi numerik ini.

Tabel 4.1 Data Permodelan

Kecepatan (m/s)	Kecepatan putar (rad/s)	<i>Time step</i> (s)	<i>Tip speed ratio</i>
5	46,07	$18,93 \times 10^{-4}$	1,08
10	99,37	$8,78 \times 10^{-4}$	1,16
15	157	$5,56 \times 10^{-4}$	1,28

4.2 *Grid Independent Test*

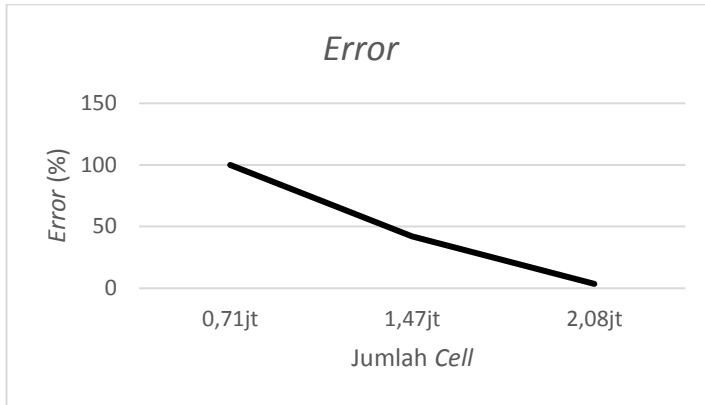
Grid independent test dilakukan bertujuan supaya permodelan yang dilakukan sudah tidak terpengaruh oleh bentuk dan kerapatan *mesh*. Dalam melakukan *grid independent test* dilakukan pada konfigurasi turbin angin tipe A, pada kecepatan 10 m/s, dan divariasikan jumlah mesh sebanyak 0,71 juta, 1,47 juta, dan 2,08 juta.

Tabel 4.2 Data *Grid Independent Test*

Jumlah <i>cell</i>	Wall Y+	Torsi rata-rata (N.m)	Error (%)
0,71 juta	68,04	$34,8 \times 10^{-4}$	-
1,47 juta	31,79	$59,9 \times 10^{-4}$	41,94
2,08 juta	36,94	$57,8 \times 10^{-4}$	3,57

Dari Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa perubahan *error* dari torsi rata-rata untuk satu putaran dengan jumlah *cell* 0,71 juta ke 1,47 juta mengalami penurunan drastis. Sedangkan *error* dari torsi rata-rata dengan jumlah *cell* 1,47 juta ke 2,08 juta

mengalami penurunan mendekati angka *error* 0. Nilai *error* dari torsi rata-rata terkecil dimiliki pada jumlah *cell* 2,08 juta.



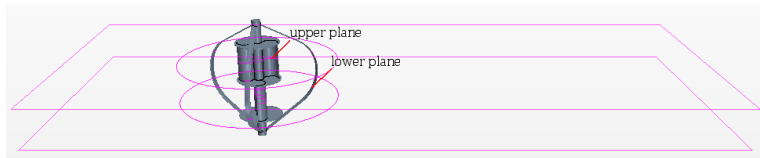
Gambar 4.1 Grafik *error* dari nilai torsi terhadap jumlah *cell*.

Sehingga dalam melakukan permodelan ini dilakukan dengan jumlah *cell* 2,08 juta dikarenakan hasil torsi rata-rata sudah bisa dikatakan konstan seiring dengan perubahan jumlah *cell*, nilai *error* yang kecil, dan bisa menampilkan kontur aliran dengan baik. Begitu juga dengan nilai *wall Y+* yang merupakan parameter non-dimensional yang menyatakan *wall distance* untuk *wall-bounded flow* yang bisa dianalisa dengan cara mengalikan nilai *friction velocity* pada dinding terdekat dengan jarak dengan dinding terdekat lalu dibagi dengan viskositas kinematik lokalnya. Nilai dari *wall Y+* sudah bisa dikatakan cukup baik untuk permodelan ini. Sedangkan untuk konfigurasi tipe B digunakan *setting* kerapatan *mesh* yang sama dan berjumlah 2,33 juta *cell*.

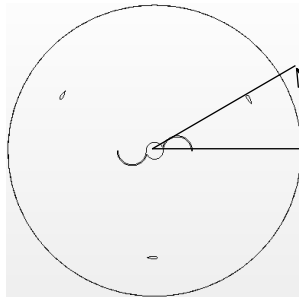
4.3 Pembahasan Turbin Angin Tipe A

Untuk menampilkan kontur kecepatan dan tekanan pada permodelan ini ditampilkan pada perpotongan penampang *xz* yang ditunjukkan dengan keterangan *upper plane* dan *lower plane* pada Gambar 4.2. Untuk *upper plane* ini merupakan perpotongan

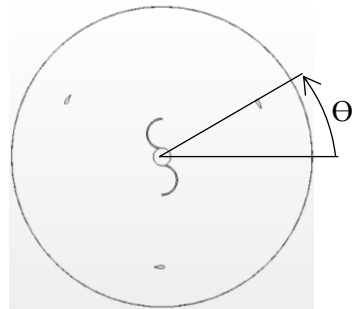
pada titik tengah tinggi dari sudu Savonius bagian *upper stage*, sedangkan *lower plane* ini merupakan perpotongan pada titik tengah tinggi dari sudu Savonius bagian *lower stage*.



(a)



(b)



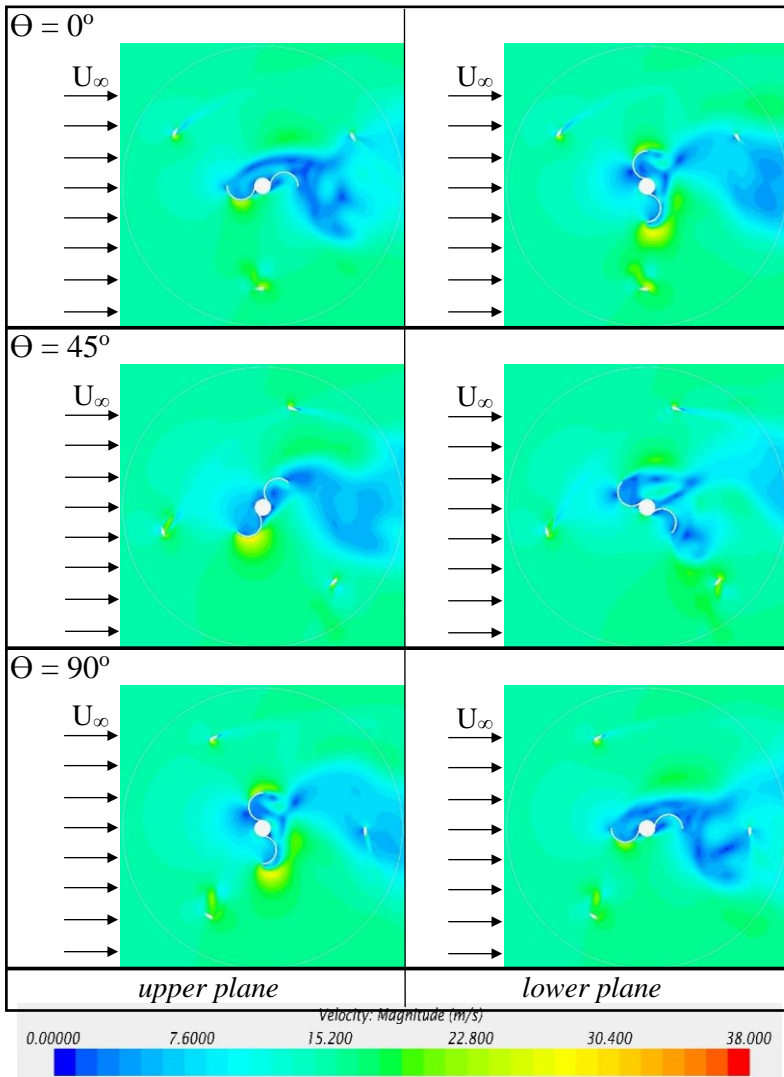
(c)

Gambar 4.2 (a) Perpotongan penampang xz yang digunakan untuk menampilkan kontur aliran. (b) Posisi turbin angin pada *upper plane* pada sudut 0° . (c) Posisi turbin angin pada *lower plane* pada sudut 0° .

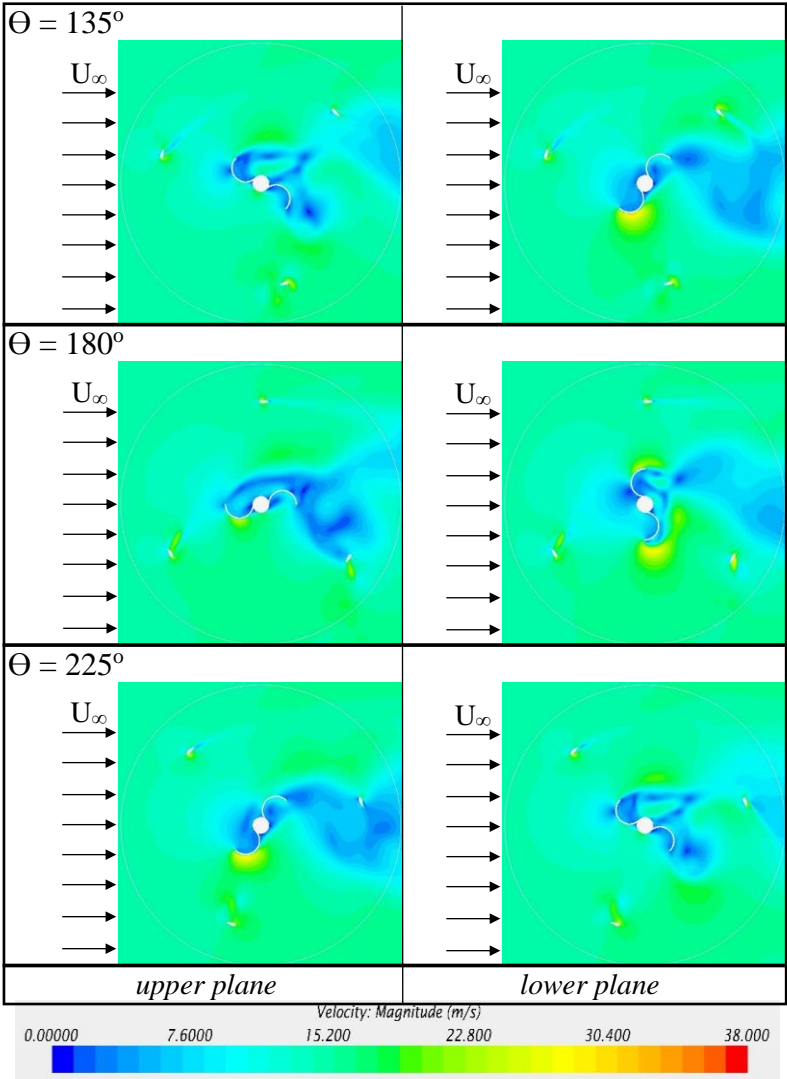
4.3.1 Kontur kecepatan

Pada Gambar 4.3, Gambar 4.4, dan Gambar 4.5 menunjukkan kontur kecepatan turbin angin tipe A pada perpotongan penampang xz pada sudut 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , dan 315° pada kecepatan angin 15 m/s. Pada Gambar *upper plane* pada posisi turbin angin 90° dapat terlihat bahwa sudu Savonius berada pada posisi tegak lurus dari *inlet*, dan salah satu sudu Darrieus berada tepat dibelakangnya sehingga aliran udara yang mengenai sudu Darrieus ini harus menabrak sudu Savonius terlebih dahulu sehingga sangat mempengaruhi

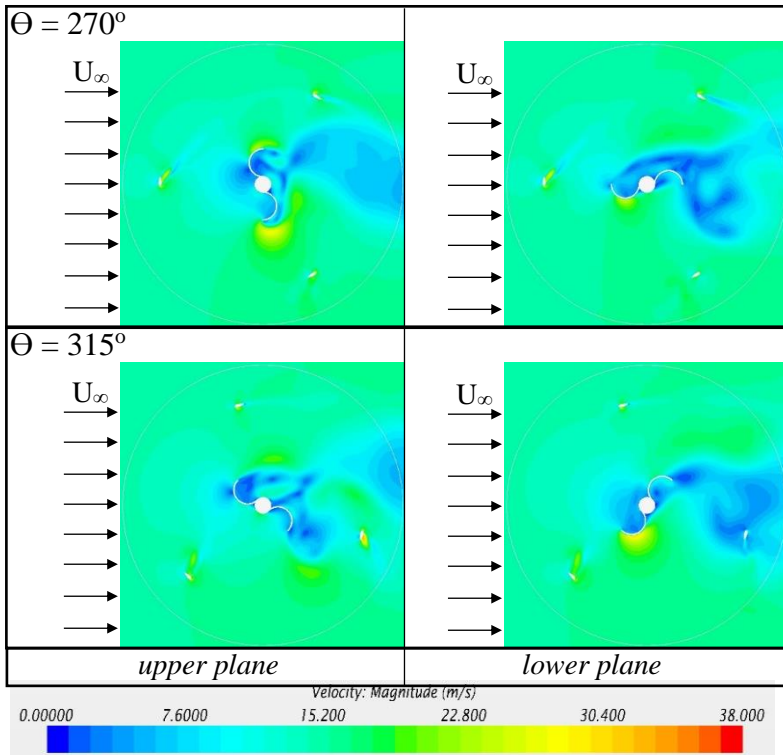
performa dari sudu Darrieus ini pada posisi tersebut. Pada posisi sudut lainnya setiap sudu Darrieus juga akan melewati daerah *wake* yang disebabkan oleh perputaran sudu Savonius dan hal tersebut mempengaruhi performa dari sudu Darrieus. Pada Gambar *upper plane* pada posisi turbin angin 270° dapat terlihat bahwa salah satu sudu Darrieus tepat berada tegak lurus dengan arah inlet. Pada posisi tersebut aliran udara yang seharusnya langsung mengenai sudu Savonius harus terdefleksi akibat sapuan putar dari sudu Darrieus. Begitu pula pada posisi lainnya aliran udara harus terdefleksi terlebih dahulu sehingga *wake* yang disebabkan sudu Darrieus yang berada di depan Savonius ini yang dapat mengganggu performa dari rotor Savonius.



Gambar 4.3 Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 0° , 45° , dan 90° dengan kecepatan angin 15 m/s.

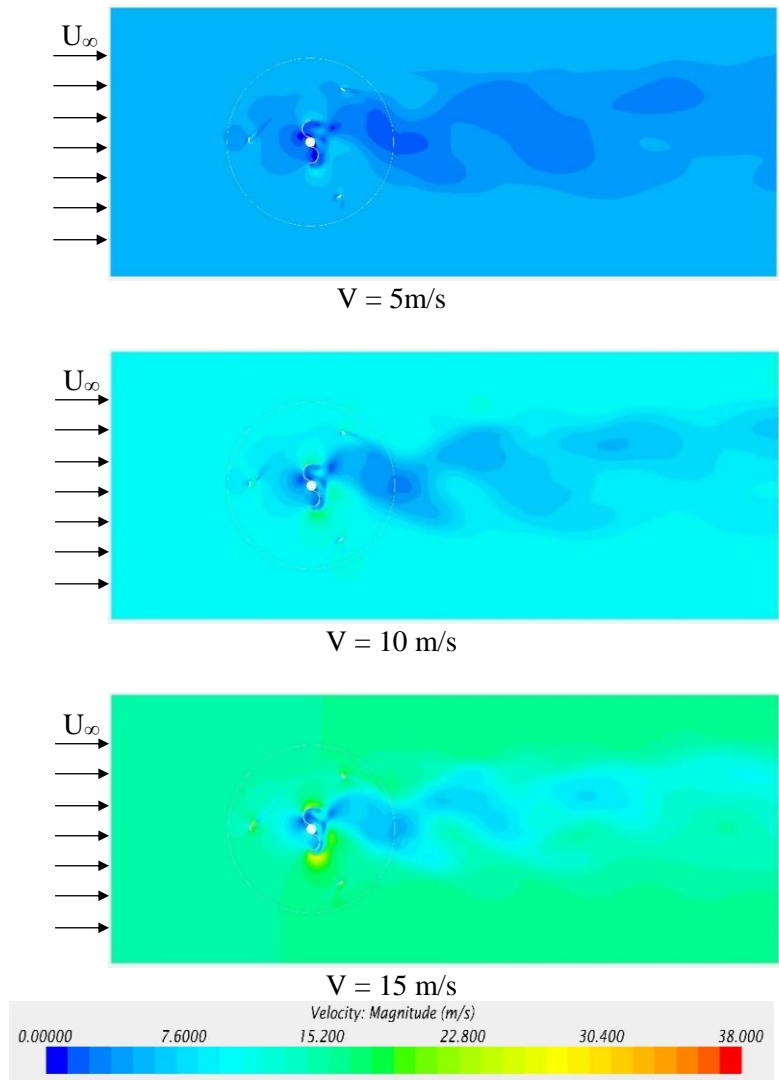


Gambar 4.4 Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 135° , 180° , dan 225° dengan kecepatan angin 15 m/s.



Gambar 4.5 Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 270° , dan 315° dengan kecepatan angin 15 m/s.

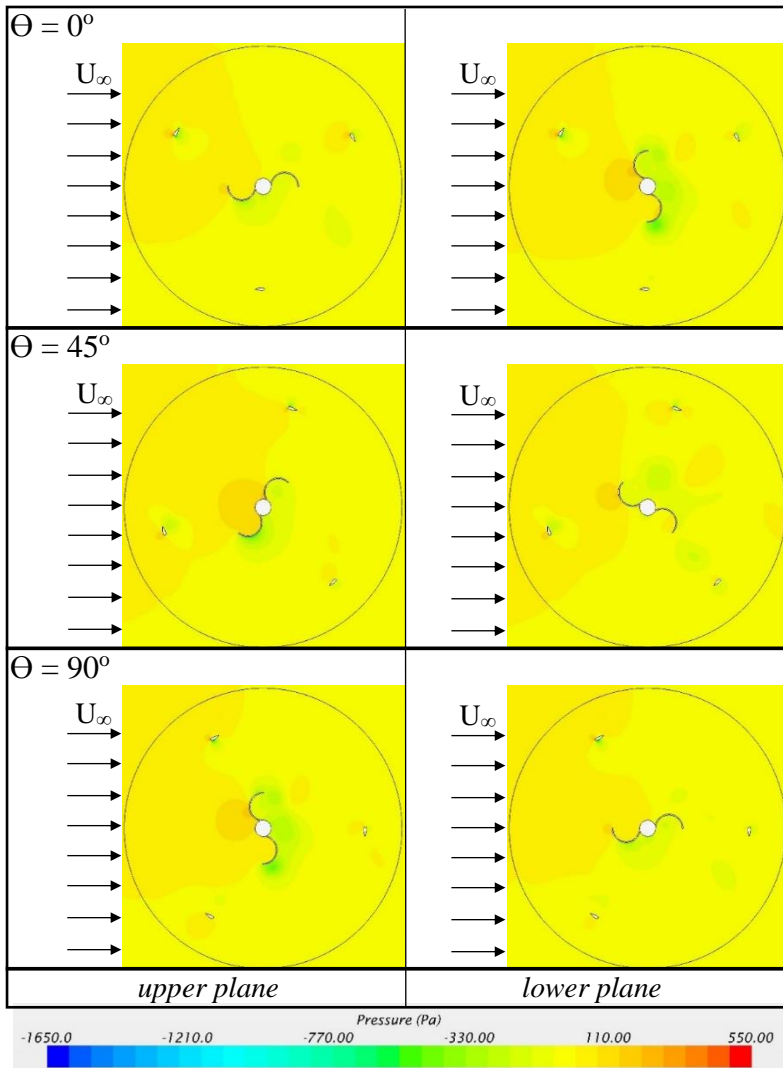
Pada Gambar 4.6 dapat dilihat perubahan *wake* yang terjadi ketika aliran udara setelah melewati turbin angin. Dari ketiga kecepatan angin 5, 10, dan 15 m/s daerah *wake* yang terjadi setelah aliran udara melalui turbin angin memiliki kontur yang hampir sama. Dari ketiganya perbedaannya hanya terletak pada *range* kecepatan minimum dan maksimum yang terjadi. Dari Gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa jarak 3,5 D atau 0,819 m dari turbin angin masih terkena daerah *wake* yang dihasilkan oleh turbin angin sehingga untuk peletakan turbin angin ini membutuhkan jarak yang lebih jauh.



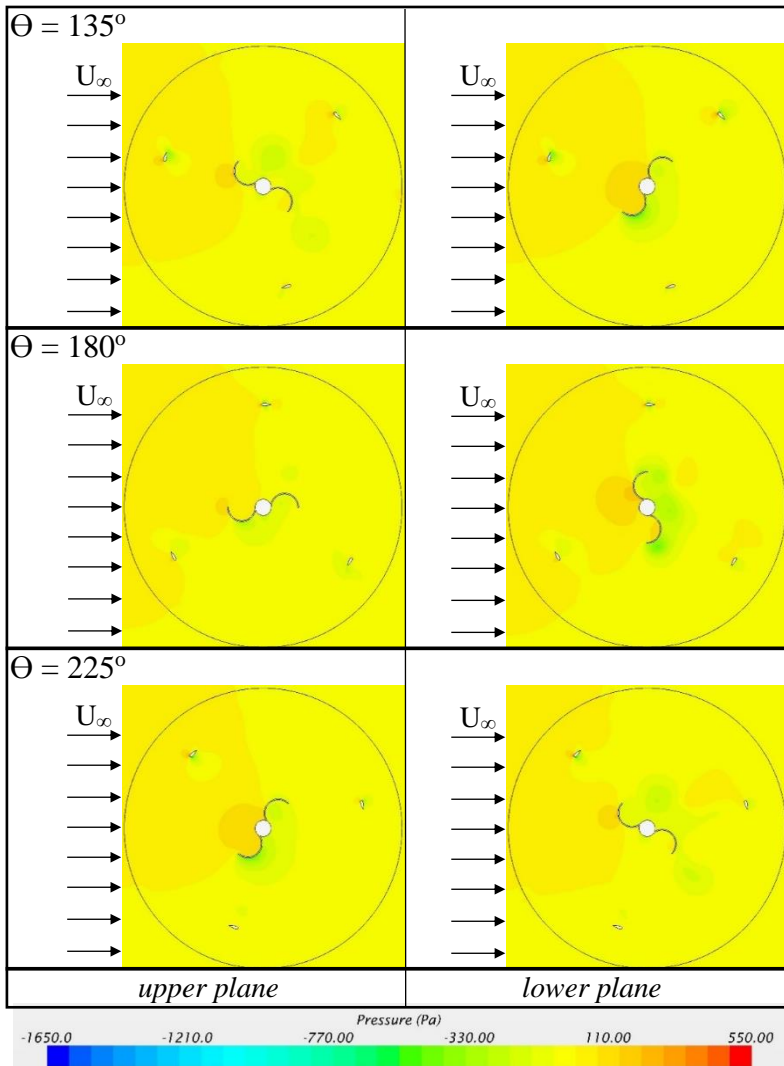
Gambar 4.6 Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 270° dengan variasi kecepatan angin pada *upper plane*.

4.3.2 Kontur tekanan

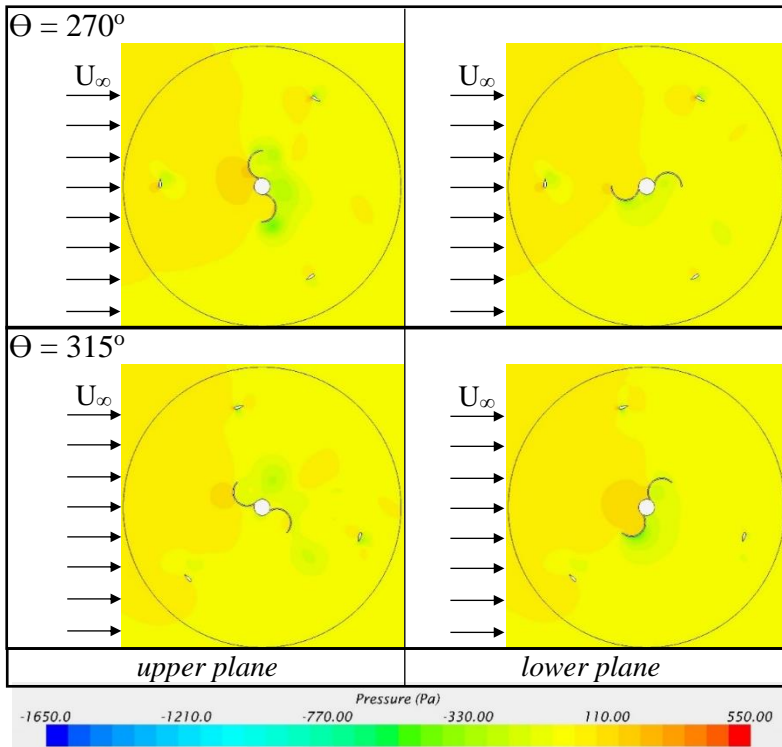
Pada Gambar 4.7, Gambar 4.8, dan Gambar 4.9 menunjukkan kontur tekanan turbin angin tipe A pada perpotongan penampang xz pada sudut 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , dan 315° pada kecepatan angin 15 m/s. Pada kontur tekanan tersebut memberi arti bahwa semakin kontur tekanan berwarna merah, maka tekanan yang terjadi di daerah tersebut semakin besar. Pada *upper plane* pada posisi 90° pada sudu Savonius *advancing blade* terdapat perbedaan warna yang cukup signifikan antara bagian yang menghadap ke arah *inlet* dengan bagian yang membelakangi arah *inlet*. Perbedaan warna ini yang menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan pada sudu tersebut. Sedangkan semakin besar tekanan maka semakin besar gaya yang bekerja pada permukaan sudu, hal inilah yang akan menyebabkan sudu Savonius dapat berputar. Pada *upper plane* pada posisi 270° dapat dilihat salah satu sudu Darrieus yang terletak paling dekat dengan area *inlet* terdapat perbedaan warna antara bagian sudu yang menghadap ke arah *inlet* dengan bagian sudu yang menghadap ke arah pusat putar turbin. Tekanan pada bagian sudu yang menghadap ke area *inlet* lebih tinggi ditunjukkan dengan warna merah. Perbedaan tekanan yang menyebabkan perbedaan gaya yang bekerja pada permukaan sudu inilah yang menyebabkan terjadinya perputaran sudu Darrieus terhadap pusat putar turbin.



Gambar 4.7 Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 0° , 45° , dan 90° dengan kecepatan angin 15 m/s.



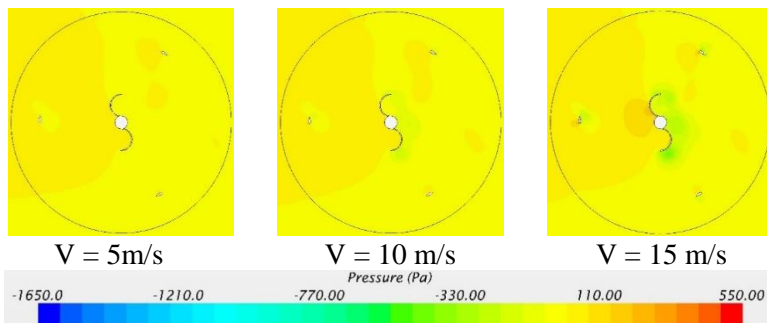
Gambar 4.8 Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 135° , 180° , dan 225° dengan kecepatan angin 15 m/s.



Gambar 4.9 Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 270° dan 315° dengan kecepatan angin 15 m/s.

Pada Gambar 4.10 dapat dilihat perbedaan tekanan yang terjadi pada perpotongan turbin angin pada *upper plane* pada sudut 270° dengan kecepatan 5, 10, dan 15 m/s. Kontur tekanan yang dihasilkan oleh ketiga kondisi tersebut tidak jauh berbeda, namun terdapat perbedaan pada selisih tekanan yang ada pada sisi *concave* atau *advancing blade* yang menghadap sisi *inlet* dengan bagian yang membelakangi bagian *inlet*. Pada kecepatan 5 m/s selisih tekanan pada *advancing blade* Savonius tidak terlalu jauh ditunjukkan dengan perbedaan warna yang tidak terlalu berbeda. Sedangkan pada kecepatan 10 m/s perbedaan warna pada sudu

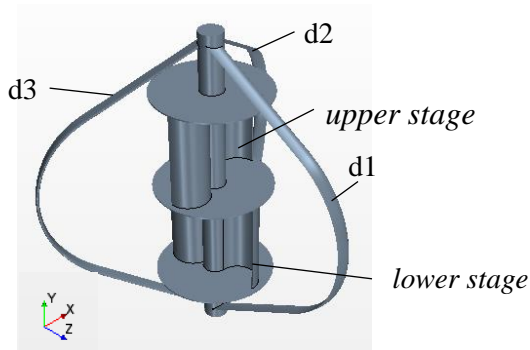
tersebut lebih mencolok. Untuk kecepatan angin 15 m/s selisih tekanan pada *advancing blade* Savonius lebih besar ditunjukkan dengan perbedaan warna yang sangat. Oleh karena itu torsi yang dihasilkan oleh sudu Savonius pada kecepatan 15 m/s menghasilkan torsi tertinggi dibandingkan dengan kondisi kecepatan angin 5 dan 10 m/s. Pada sudu Darrieus hal serupa juga terjadi. Perbedaan selisih tekanan yang terjadi pada sudu Darrieus yang paling dekat dengan daerah *inlet* pada sisi yang menghadap ke *inlet* dan yang membelakangi *inlet*. Selisih tekanan sudu Darrieus pada saat kecepatan angin 5 m/s tidak begitu signifikan, selisih tekanan pada saat kecepatan angin 10 m/s lebih signifikan, dan selisih tekanan pada saat kecepatan angin 15 m/s lebih signifikan diantara ketiganya. Hal inilah yang menyebabkan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus naik seiring dengan bertambahnya kecepatan angin.



Gambar 4.10 Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe A pada sudut 270° dengan variasi kecepatan angin pada *upper plane*.

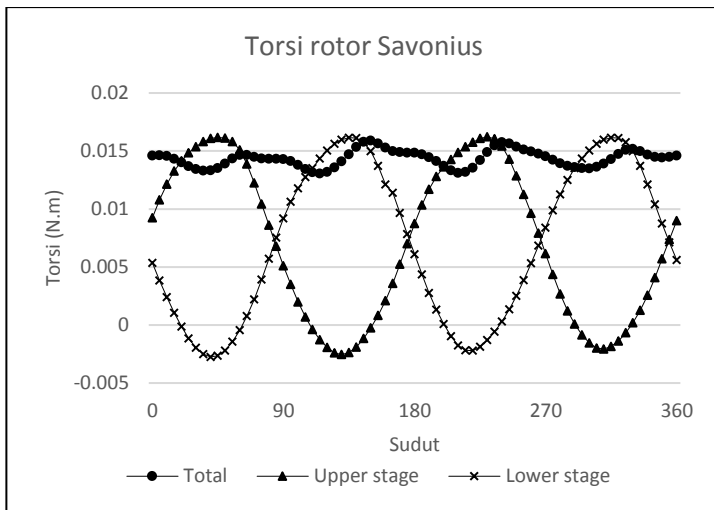
4.3.3 Torsi

Berikut adalah hasil torsi yang didapatkan dari hasil simulasi numerik ini. Notasi $d1$, $d2$, dan $d3$ adalah masing-masing sudu Darrieus. Untuk lebih jelasnya definisi masing-masing sudu dapat dilihat pada Gambar 4.11.

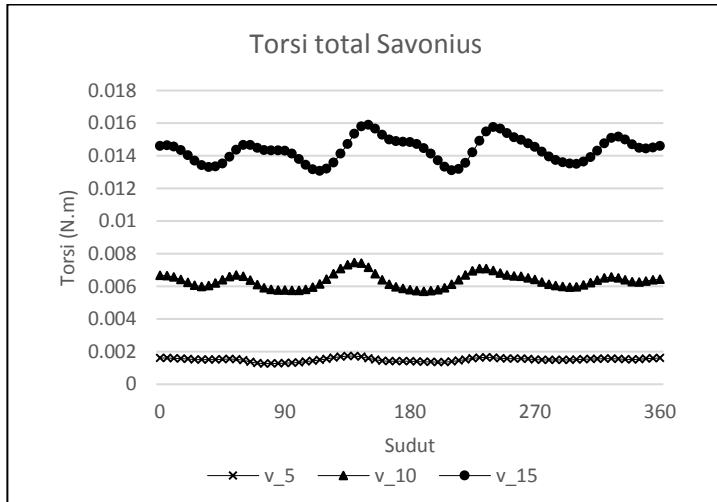


Gambar 4.11 Definisi bagian untuk pengambilan data torsi.

Pada Gambar 4.12 merupakan hasil torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius pada tiap tingkat terhadap sudut putar turbin. Setiap tingkat memiliki tren grafik yang sama membentuk kurva sinusoidal dengan titik puncak berada pada 0,017 N.m, dan berada pada nilai minimum sebesar -0,003 N.m. Untuk sudut optimum terjadi saat tiap *stage* berada pada saat posisi membentuk sudut 45° terhadap arah datangnya aliran. Pada Gambar 4.13 ditunjukkan grafik torsi rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius pada berbagai kecepatan. Untuk torsi rata-rata yang dihasilkan pada kecepatan 5 m/s sebesar 0,0015 N.m, pada kecepatan 10 m/s sebesar 0,0063 N.m, dan pada kecepatan 15 m/s sebesar 0,0143 N.m. Seiring bertambahnya kecepatan angin maka torsi rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius semakin meningkat. Torsi negatif terjadi ketika gaya resultan yang bekerja pada sudu-sudu Savonius bekerja pada arah berlawanan dari arah putaran turbin angin.

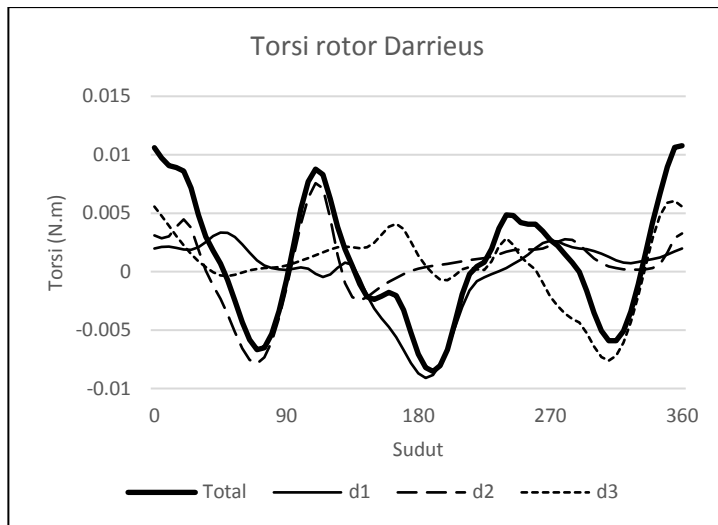


Gambar 4.12 Hasil torsi pada sudu Savonius dengan kecepatan angin 15 m/s.

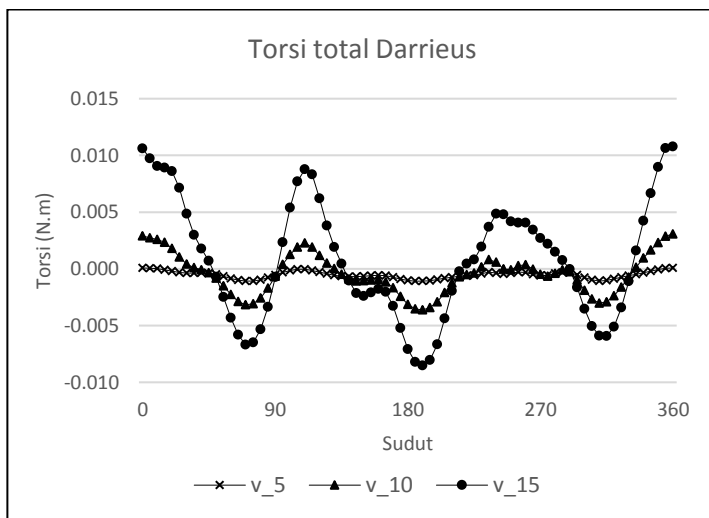


Gambar 4.13 Hasil torsi total pada rotor Savonius dengan variasi kecepatan angin.

Pada Gambar 4.14 merupakan hasil torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus pada tiap sudu terhadap sudut putar turbin. Grafik torsi yang dihasilkan oleh d1, d2, dan d3 tidaklah sama, hal ini dikarenakan posisi tiap sudu yang berbeda terhadap posisi turbin angin Savonius pada sudut yang sama. Pada Gambar 4.15 ditunjukkan grafik torsi rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus pada berbagai kecepatan. Tren grafik yang dihasilkan sama, hanya berbeda pada *range* fluktuasinya. Untuk torsi rata-rata yang dihasilkan pada kecepatan 5 m/s sebesar -0,00053 N.m, pada kecepatan 10 m/s sebesar -0,00044 N.m, dan pada kecepatan 15 m/s sebesar 0,0008 N.m. Seiring bertambahnya kecepatan angin maka torsi rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus semakin meningkat. Pada kecepatan 5 dan 10 m/s turbin angin Darrieus menghasilkan torsi bernilai negatif yang berarti menghambat putaran turbin angin. Hal ini dikarenakan pada dasarnya turbin angin Darrieus mampu bekerja pada putaran tinggi. Sedangkan pada kecepatan 15 m/s torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus bernilai positif sehingga menambah daya putar yang dihasilkan oleh turbin angin. Torsi negatif terjadi ketika gaya resultan yang bekerja pada sudu-sudu Darrieus bekerja pada arah berlawanan dari arah putaran turbin angin.

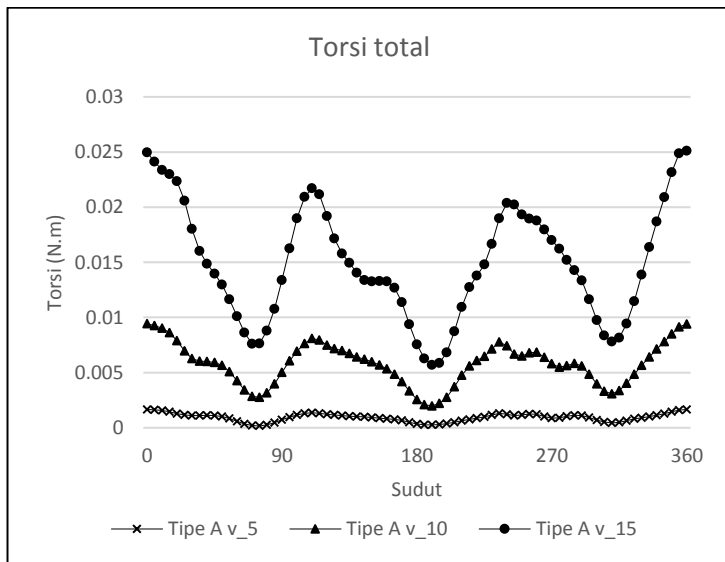


Gambar 4.14 Hasil torsi pada sudu Darrieus dengan kecepatan angin 15 m/s.



Gambar 4.15 Hasil torsi total pada rotor Darrieus dengan variasi kecepatan angin.

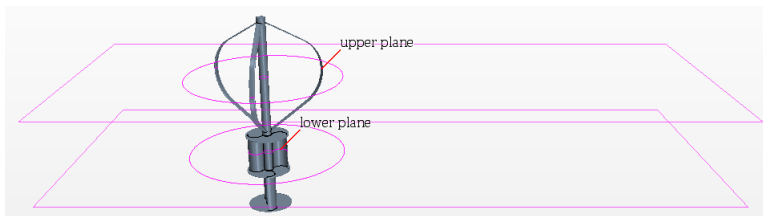
Pada Gambar 4.16 merupakan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin tipe A pada kecepatan angin 5, 10, dan 15 m/s. Untuk tren grafik pada kecepatan 5, 10, dan 15 m/s sebenarnya sama, namun hanya berbeda pada *range* fluktuasinya. Torsi rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin tipe A dalam satu putaran pada kecepatan 5 m/s sebesar 0,00094 N.m, untuk kecepatan angin sebesar 10 m/s torsi yang dihasilkan sebesar 0.005788 N.m, dan pada kecepatan angin 15 m/s torsi yang dihasilkan sebesar 0.0155 N.m. Semakin tinggi kecepatan angin yang mengenai turbin, maka torsi yang dihasilkan juga semakin tinggi. Hal ini dikarenakan momentum yang dimiliki oleh angin lebih besar seiring dengan naiknya kecepatan. Momentum yang semakin besar ini mengenai turbin angin sehingga membuat turbin angin ini berputar. Sehingga semakin tingginya kecepatan angin menyebabkan naiknya momentum dan menyebabkan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin semakin tinggi.



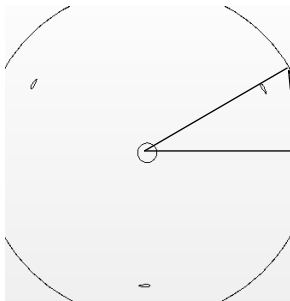
Gambar 4.16 Hasil torsi total untuk satu putaran turbin angin tipe A.

4.4 Pembahasan Turbin Angin Tipe B

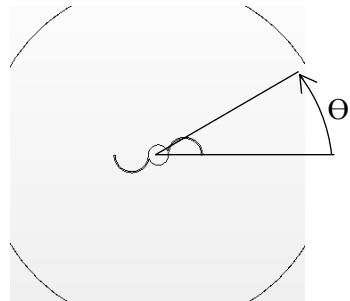
Untuk menampilkan kontur kecepatan dan tekanan pada permodelan ini ditampilkan pada perpotongan penampang xz yang ditunjukkan dengan keterangan *upper plane* dan *lower plane* pada Gambar 4.17. Untuk *upper plane* merupakan perpotongan di titik terluar sudu Darrieus, dan *lower plane* merupakan perpotongan di titik tengah tinggi dari sudu Savonius bagian *upper stage*.



(a)



(b)



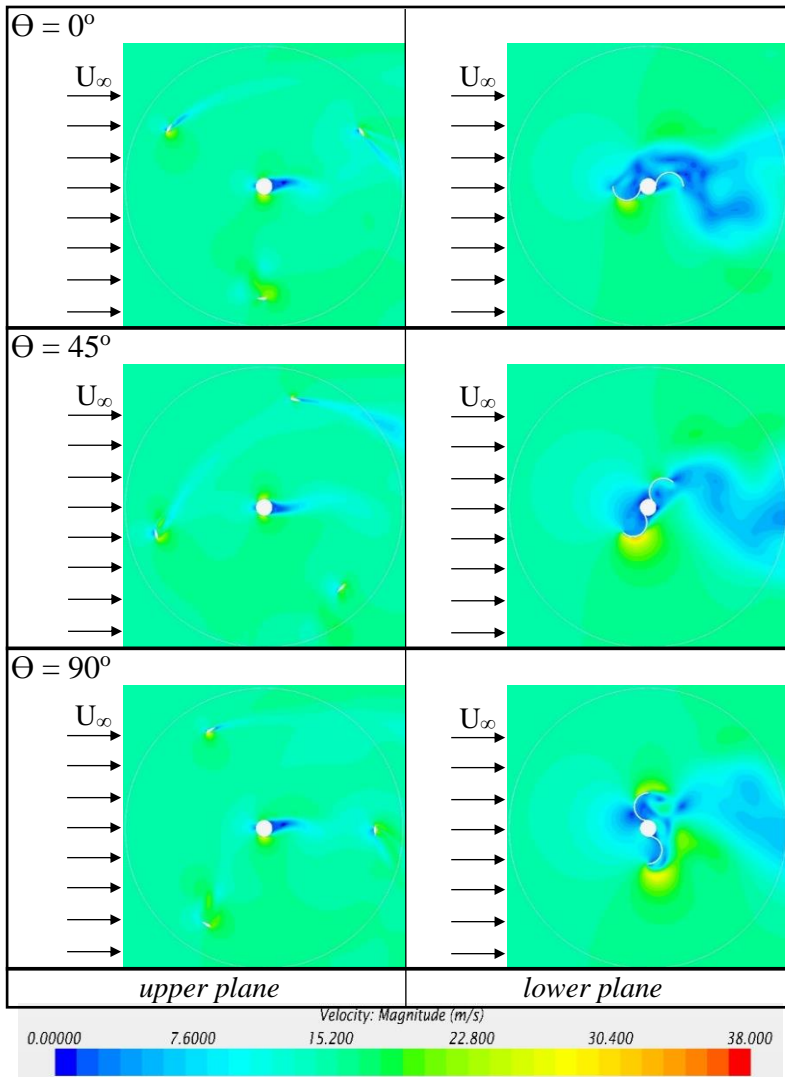
(c)

Gambar 4.17 (a) Perpotongan penampang xz yang digunakan untuk menampilkan kontur aliran. (b) Posisi turbin angin pada *upper plane* pada sudut 0° . (c) Posisi turbin angin pada *lower plane* pada sudut 0° .

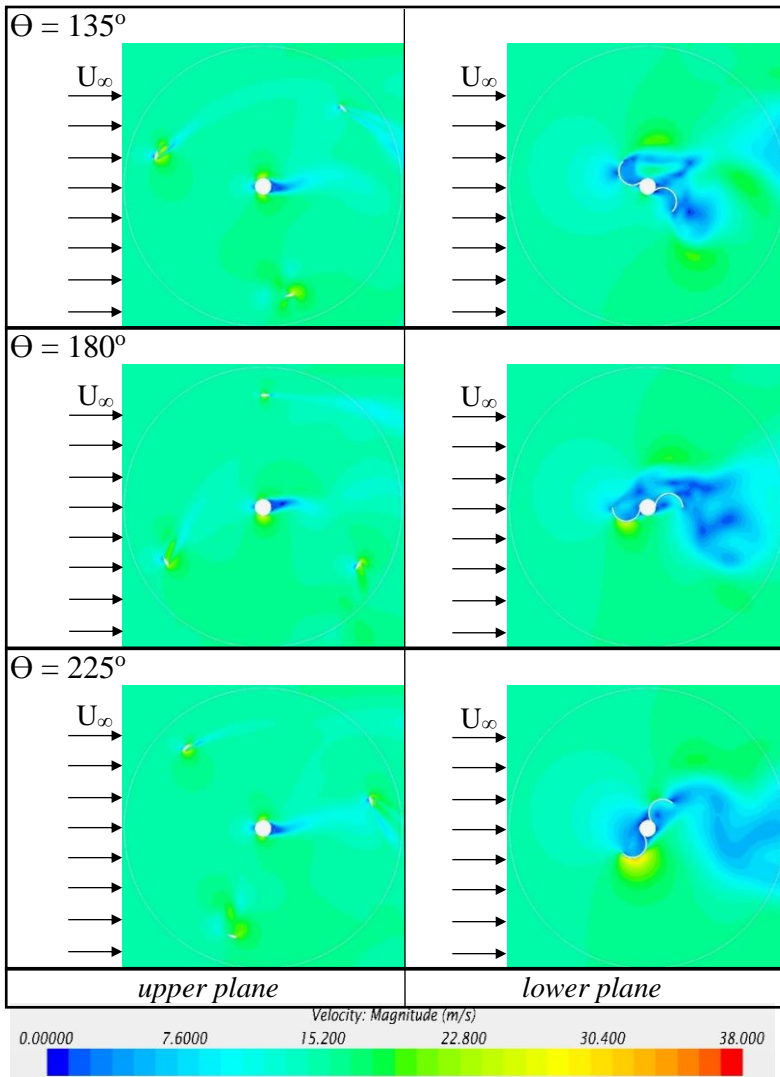
4.4.1 Kontur kecepatan

Pada Gambar 4.18, Gambar 4.19, dan Gambar 4.20 menunjukkan kontur kecepatan turbin angin tipe B pada

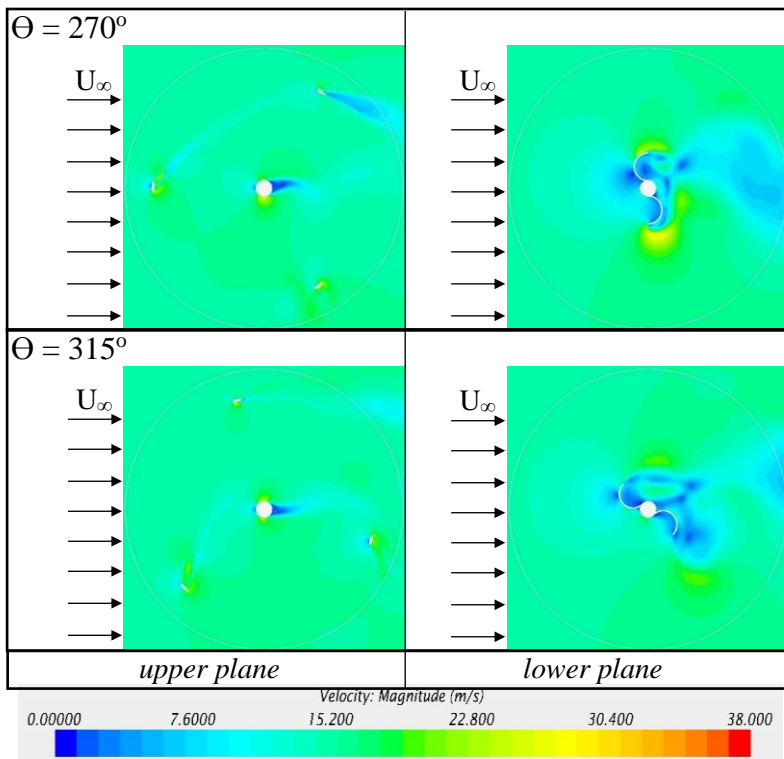
perpotongan penampang xz pada sudut 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , dan 315° pada kecepatan angin 15 m/s. Dapat dilihat kontur aliran pada *upper plane* yang menunjukkan aliran melewati turbin angin Darrieus bahwa sebelum aliran udara mengenai sudu-sudu Darrieus tidak terhalang oleh apapun. Berbeda dengan kontur aliran pada *upper plane* untuk turbin angin tipe A, bahwa sebelum mengenai sudu Darrieus, pada beberapa posisi tertentu aliran udara harus mengenai sudu Savonius terlebih dahulu. Begitu juga kontur kecepatan yang ditampilkan pada *lower plane*, aliran udara yang mengenai turbin angin Savonius merupakan aliran *freestream* yang tidak terpengaruh oleh sapuan putaran dari sudu Darrieus sebagaimana yang terjadi pada turbin angin tipe A. Sehingga pada konfigurasi tipe B ini masing-masing turbin angin dapat bekerja dalam performa optimum dikarenakan masing-masing turbin angin langsung mendapatkan aliran *freestream* tanpa mempengaruhi satu sama lain.



Gambar 4.18 Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 0° , 45° , dan 90° dengan kecepatan angin 15 m/s.



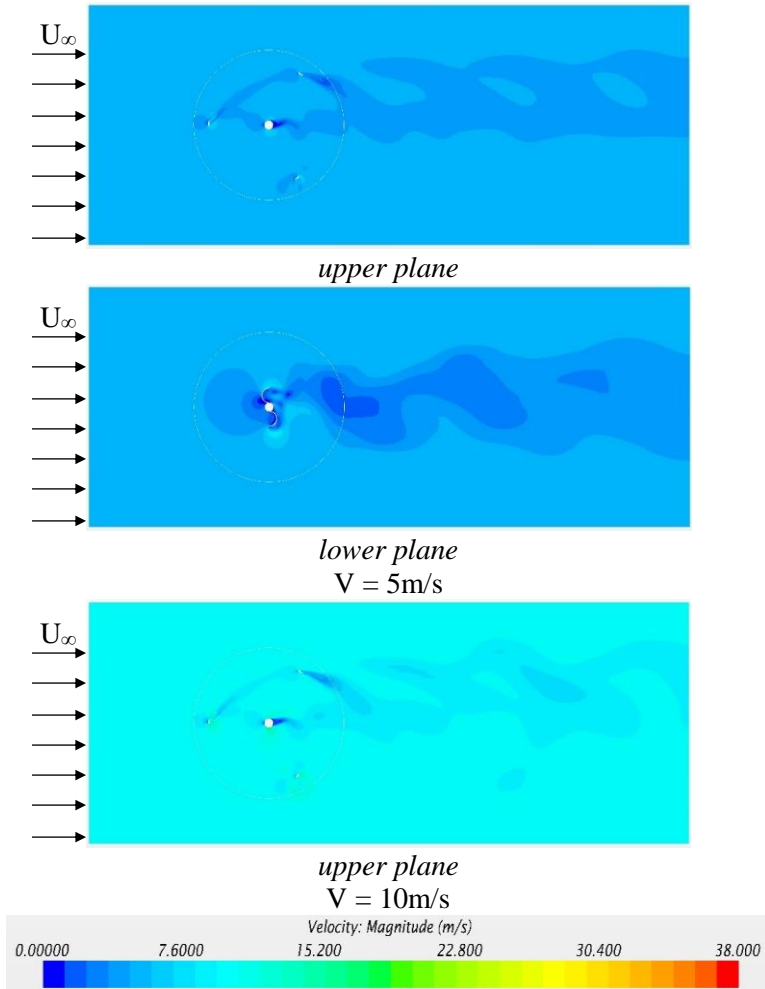
Gambar 4.19 Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 135° , 180° , dan 225° dengan kecepatan angin 15 m/s.



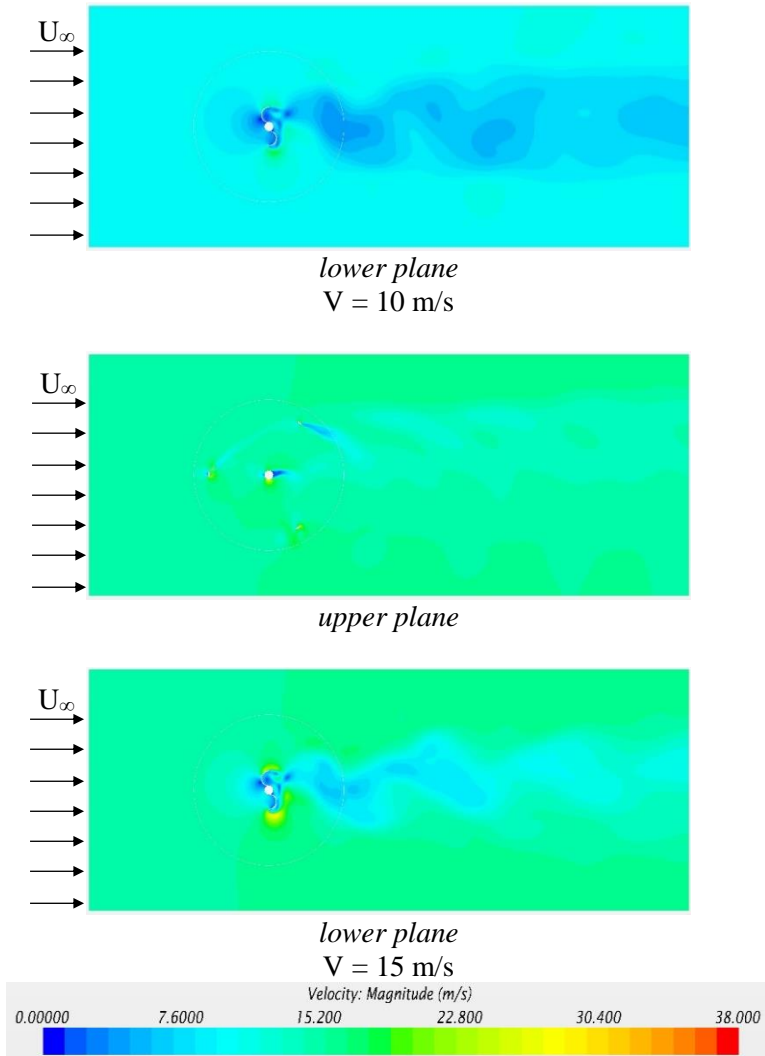
Gambar 4.20 Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 270° dan 315° dengan kecepatan angin 15 m/s.

Pada Gambar 4.21 dan Gambar 4.22 dapat dilihat perubahan *wake* yang terjadi ketika aliran udara setelah melewati turbin angin. Daerah *wake* pada kecepatan angin 15 m/s paling terlihat perbedaannya antara daerah *wake* yang dihasilkan oleh sudu Darreius dan sudu Savonius. Pada *upper plane* menunjukkan *wake* yang terjadi setelah aliran udara melewati turbin angin Darreius sedangkan *lower plane* menunjukkan *wake* yang terjadi setelah aliran udara melewati turbin angin Savonius. Daerah *wake* yang dihasilkan oleh turbin angin Darreius lebih luas jangkauannya daripada *wake* yang dihasilkan oleh turbin angin

Savonius. Hal ini dikarenakan jari-jari jangkauan sudu Darrieus lebih jauh dibandingkan dengan sudu Savonius.



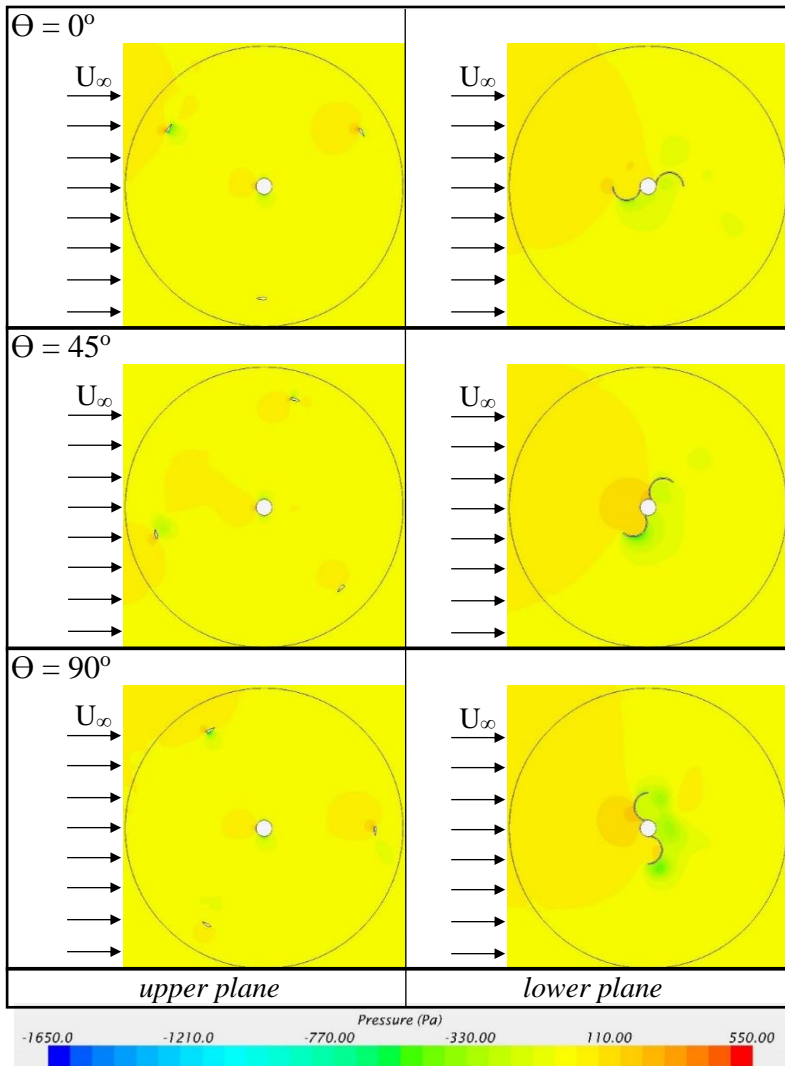
Gambar 4.21 Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 270° pada kecepatan 5 m/s (*upper plane* dan *lower plane*) dan kecepatan 10 m/s (*upper plane*).



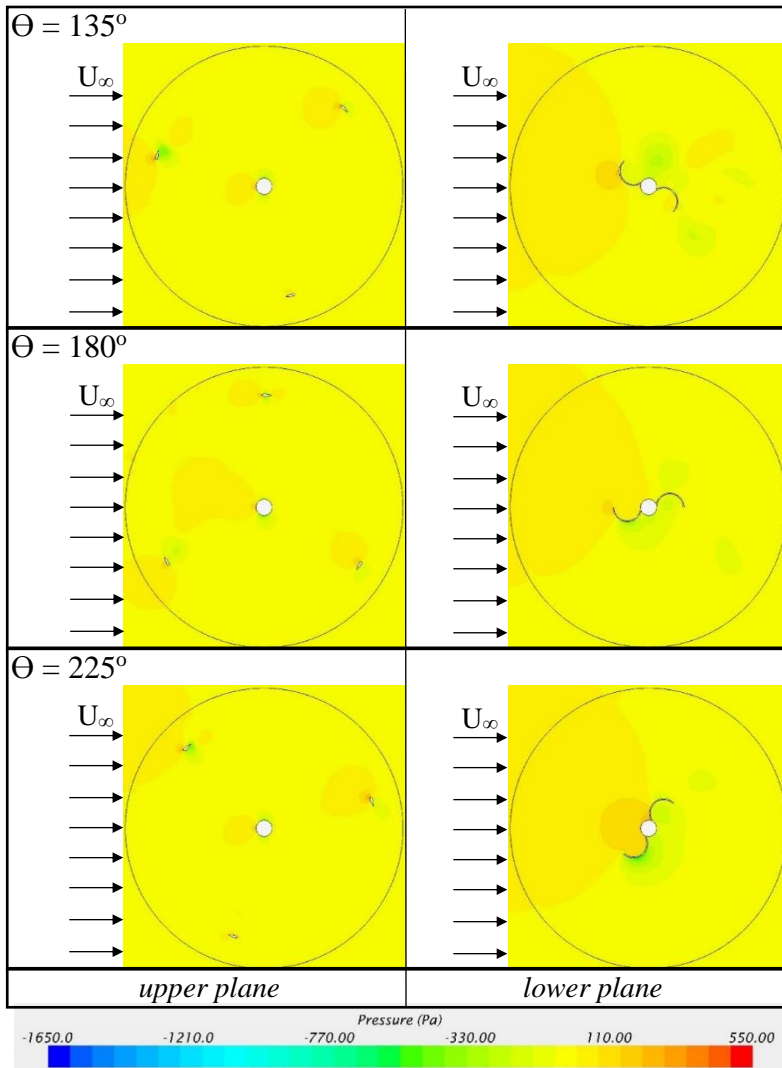
Gambar 4.22 Kontur kecepatan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 270° pada kecepatan 10 m/s (*lower plane*) dan kecepatan 10 m/s (*upper plane* dan *lower plane*).

4.4.2 Kontur tekanan

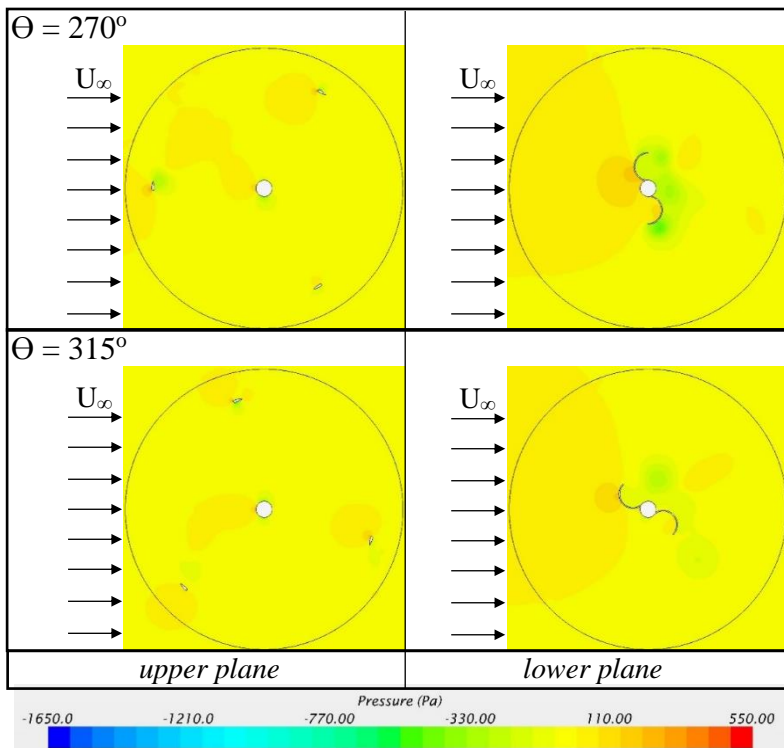
Pada Gambar 4.23, Gambar 4.24, dan Gambar 4.25 menunjukkan kontur tekanan turbin angin tipe B pada perpotongan penampang xz pada sudut 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , dan 315° pada kecepatan angin 15 m/s. Pada kontur tekanan tersebut memberi arti bahwa semakin kontur tekanan berwarna merah, maka tekanan yang terjadi di daerah tersebut semakin besar. Pada *lower plane* pada posisi 90° pada sudu Savonius *advancing blade* terdapat perbedaan warna yang cukup signifikan antara bagian yang menghadap ke arah *inlet* dengan bagian yang membelakangi arah *inlet*. Perbedaan warna ini yang menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan pada sudu tersebut. Sedangkan semakin besar tekanan maka semakin besar gaya yang bekerja pada permukaan sudu, hal inilah yang akan menyebabkan sudu Savonius dapat berputar. Pada *upper plane* pada posisi 270° dapat dilihat salah satu sudu Darrieus yang terletak paling dekat dengan area *inlet* terdapat perbedaan warna antara bagian sudu yang menghadap ke arah *inlet* dengan bagian sudu yang menghadap ke arah pusat putar turbin. Tekanan pada bagian sudu yang menghadap ke area *inlet* lebih tinggi ditunjukkan dengan warna merah. Perbedaan tekanan yang menyebabkan perbedaan gaya yang bekerja pada permukaan sudu inilah yang menyebabkan terjadinya perputaran sudu Darrieus terhadap pusat putar turbin.



Gambar 4.23 Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 0° , 45° , dan 90° dengan kecepatan angin 15 m/s.

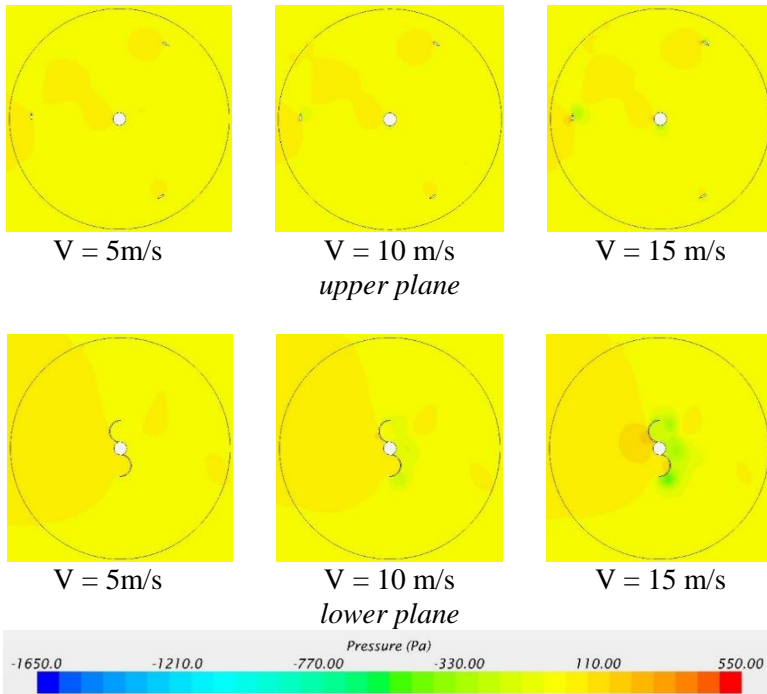


Gambar 4.24 Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 135° , 180° , dan 225° dengan kecepatan angin 15 m/s.



Gambar 4.25 Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 270° dan 315° dengan kecepatan angin 15 m/s.

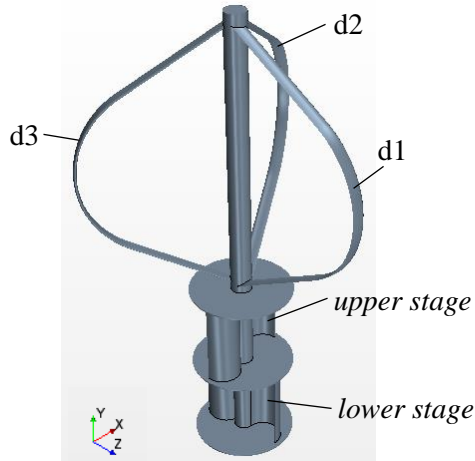
Pada Gambar 4.26 dapat dilihat perbedaan tekanan yang terjadi pada perpotongan turbin angin pada *upper plane* dan *lower plane* pada sudut 270° dengan kecepatan 5, 10, dan 15 m/s. Pada *upper plane* ditunjukkan tiga kondisi kontur tekanan pada kecepatan angin yang berbeda. Ketiga kondisi yang ditunjukkan dengan kontur tekanan tidaklah jauh berbeda. Hanya terjadi perbedaan selisih tekanan pada sudu Darrieus yang paling dekat dengan daerah *inlet* pada sisi yang menghadap ke *inlet* dan yang membelakangi *inlet*. Selisih tekanan sudu Darrieus pada saat kecepatan angin 5 m/s tidak begitu signifikan, selisih tekanan pada saat kecepatan angin 10 m/s lebih signifikan, dan selisih tekanan pada saat kecepatan angin 15 m/s lebih signifikan diantara ketiganya. Hal inilah yang menyebabkan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus naik seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Pada *lower plane* Kontur tekanan yang dihasilkan oleh ketiga kondisi tersebut tidak jauh berbeda, namun terdapat perbedaan pada selisih tekanan yang ada pada sisi *concave* atau *advancing blade* Savonius yang menghadap sisi *inlet* dengan bagian yang membelakangi bagian *inlet*. Pada kecepatan 5 m/s selisih tekanan pada *advancing blade* Savonius tidak terlalu jauh ditunjukkan dengan perbedaan warna yang tidak terlalu berbeda. Sedangkan pada kecepatan 10 m/s perbedaan warna pada sudu tersebut lebih mencolok. Untuk kecepatan angin 15 m/s selisih tekanan pada *advancing blade* Savonius lebih besar ditunjukkan dengan perbedaan warna yang sangat signifikan pada sisi yang menghadap ke sisi *inlet* dengan sisi yang menghadap ke sisi *outlet*. Oleh karena itu torsi yang dihasilkan oleh sudu Savonius pada kecepatan 15 m/s menghasilkan torsi tertinggi dibandingkan dengan kondisi kecepatan angin 5 dan 10 m/s.



Gambar 4.26 Kontur tekanan turbin angin konfigurasi tipe B pada sudut 270° dengan variasi kecepatan angin pada *upper plane* (sebelah atas) dan *lower plane* (sebelah bawah).

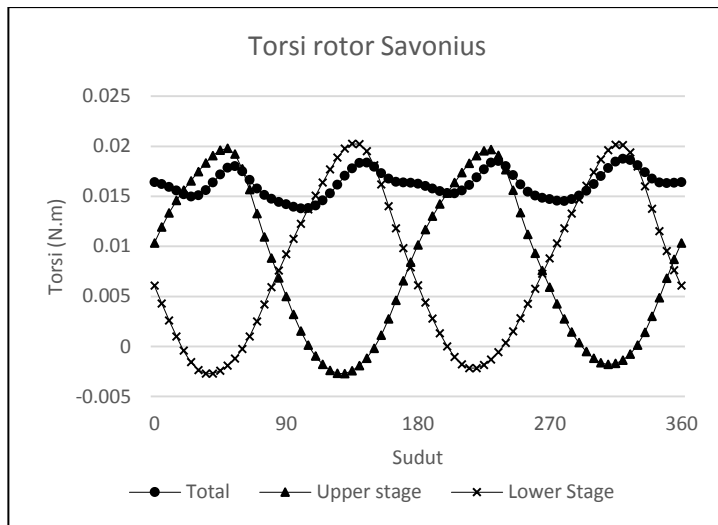
4.4.3 Torsi

Berikut adalah hasil torsi yang didapatkan dari hasil simulasi numerik ini. Notasi d1, d2, dan d3 adalah masing-masing sudu Darrieus. Untuk lebih jelasnya definisi masing-masing sudu dapat dilihat pada Gambar 4.27.

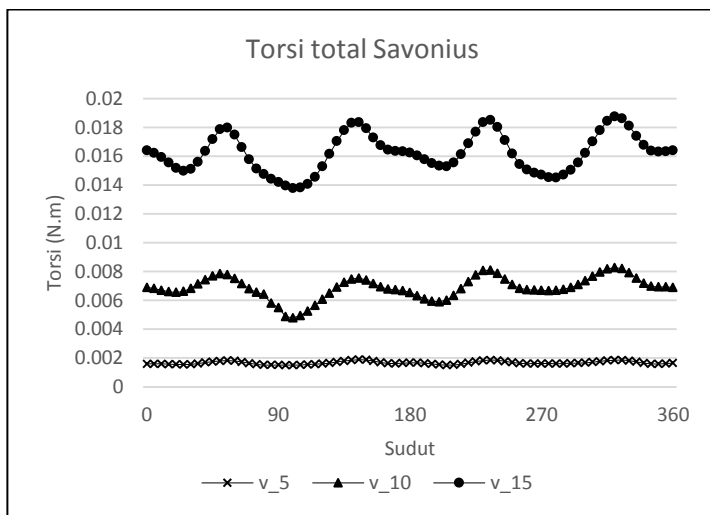


Gambar 4.27 Definisi bagian untuk pengambilan data torsi.

Pada Gambar 4.28 merupakan hasil torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius pada tiap tingkat terhadap sudut putar turbin. Setiap tingkat memiliki tren grafik yang sama membentuk kurva sinusoidal dengan titik puncak berada pada 0,017 N.m, dan berada pada nilai minimum sebesar -0,003 N.m. Untuk sudut optimum terjadi saat tiap *stage* berada pada saat posisi membentuk sudut 45° terhadap arah datangnya aliran. Pada Gambar 4.29 ditunjukkan grafik torsi rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius pada berbagai kecepatan. Untuk torsi rata-rata yang dihasilkan pada kecepatan 5 m/s sebesar 0,00166 N.m, pada kecepatan 10 m/s sebesar 0,00688 N.m, dan pada kecepatan 15 m/s sebesar 0,0162 N.m. Seiring bertambahnya kecepatan angin maka torsi rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius semakin meningkat. Torsi negatif terjadi ketika gaya resultan yang bekerja pada sudu-sudu Savonius bekerja pada arah berlawanan dari arah putaran turbin angin.

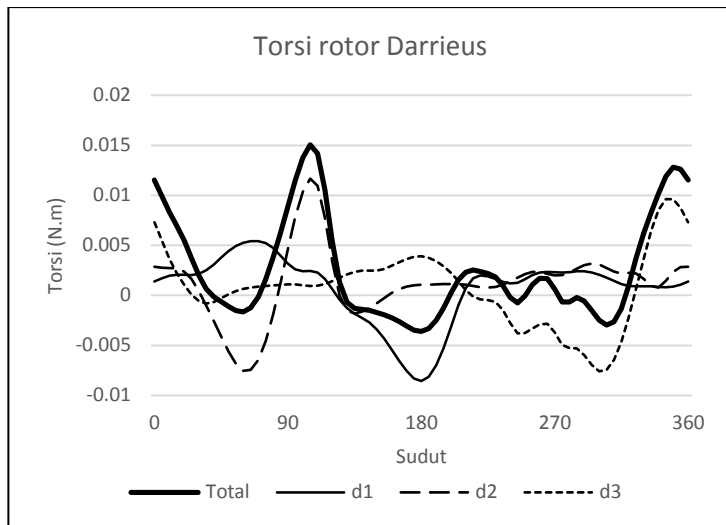


Gambar 4.28 Hasil torsi pada sudu Savonius dengan kecepatan angin 15 m/s.

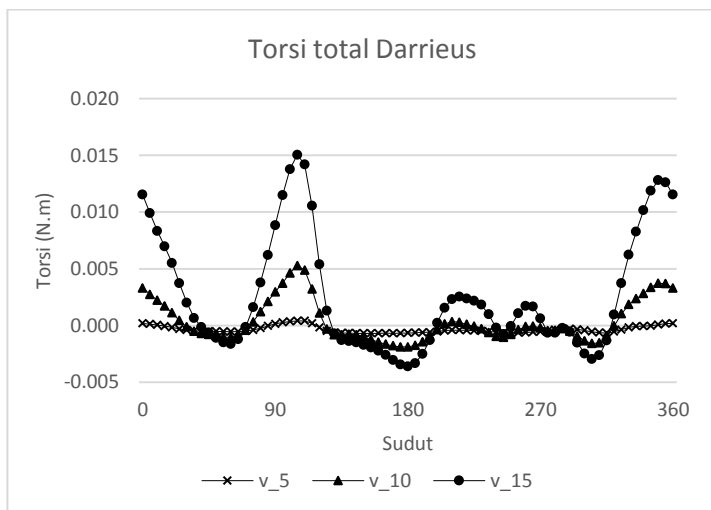


Gambar 4.29 Hasil torsi total pada rotor Savonius dengan variasi kecepatan angin.

Pada Gambar 4.30 merupakan hasil torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus pada tiap sudu terhadap sudut putar turbin. Grafik torsi yang dihasilkan oleh d1, d2, dan d3 tidaklah sama, hal ini dikarenakan posisi tiap sudu yang berbeda terhadap posisi turbin angin Savonius pada sudut yang sama. Pada Gambar 4.31 ditunjukkan grafik torsi rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus pada berbagai kecepatan. Tren grafik yang dihasilkan sama, hanya berbeda pada *range* fluktuasinya. Untuk torsi rata-rata yang dihasilkan pada kecepatan 5 m/s sebesar -0,000361 N.m, pada kecepatan 10 m/s sebesar 0,00035 N.m, dan pada kecepatan 15 m/s sebesar 0,0025 N.m. Seiring bertambahnya kecepatan angin maka torsi rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus semakin meningkat. Pada kecepatan 5 m/s turbin angin Darrieus menghasilkan torsi bernilai negatif yang berarti menghambat putaran turbin angin. Hal ini dikarenakan pada dasarnya turbin angin Darrieus mampu bekerja pada putaran tinggi. Sedangkan pada kecepatan 10 dan 15 m/s torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus bernilai positif sehingga menambah daya putar yang dihasilkan oleh turbin angin. Torsi negatif terjadi ketika gaya resultan yang bekerja pada sudu-sudu Darrieus bekerja pada arah berlawanan dari arah putaran turbin angin.

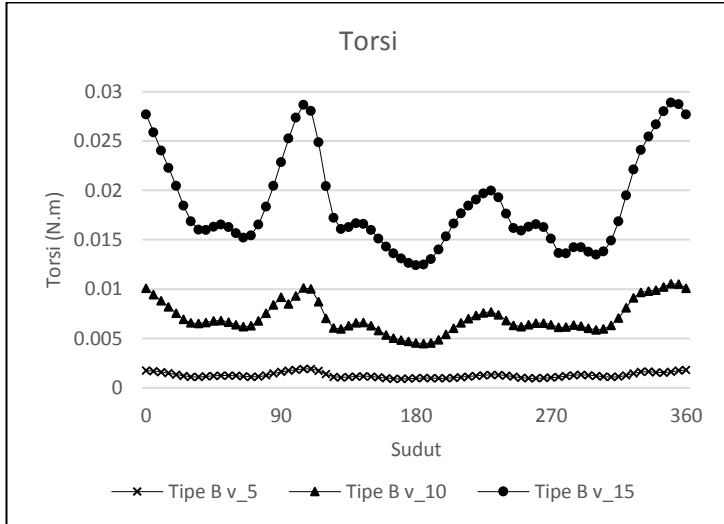


Gambar 4.30 Hasil torsi pada sudu Darrieus dengan kecepatan angin 15 m/s.



Gambar 4.31 Hasil torsi total pada rotor Darrieus dengan variasi kecepatan angin.

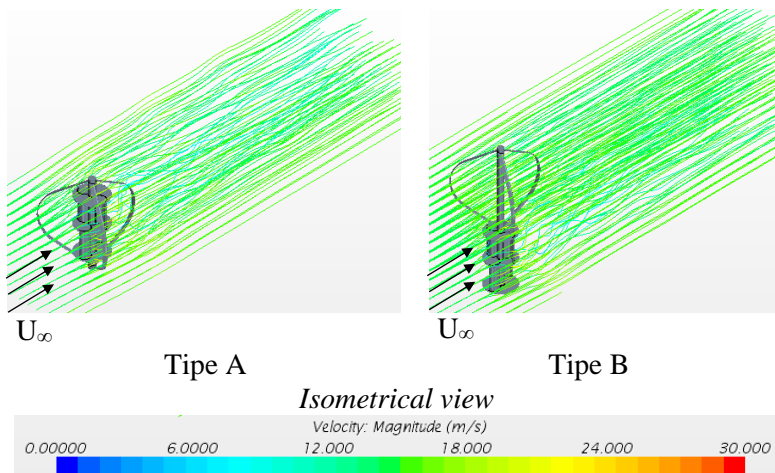
Pada Gambar 4.32 merupakan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin tipe B pada kecepatan angin 5, 10, dan 15 m/s. Untuk tren grafik pada kecepatan 5, 10, dan 15 m/s sebenarnya sama, namun hanya berbeda pada *range* fluktuasinya. Torsi rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin tipe B dalam satu putaran pada kecepatan 5 m/s sebesar 0,00127 N.m, untuk kecepatan angin sebesar 10 m/s torsi yang dihasilkan sebesar 0.00714 N.m, dan pada kecepatan angin 15 m/s torsi yang dihasilkan sebesar 0.0185 N.m. Semakin tinggi kecepatan angin yang mengenai turbin, maka torsi yang dihasilkan juga semakin tinggi. Hal ini dikarenakan momentum yang dimiliki oleh angin lebih besar seiring dengan naiknya kecepatan. Momentum yang semakin besar ini mengenai turbin angin sehingga membuat turbin angin ini berputar. Sehingga semakin tingginya kecepatan angin menyebabkan naiknya momentum dan menyebabkan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin semakin tinggi.



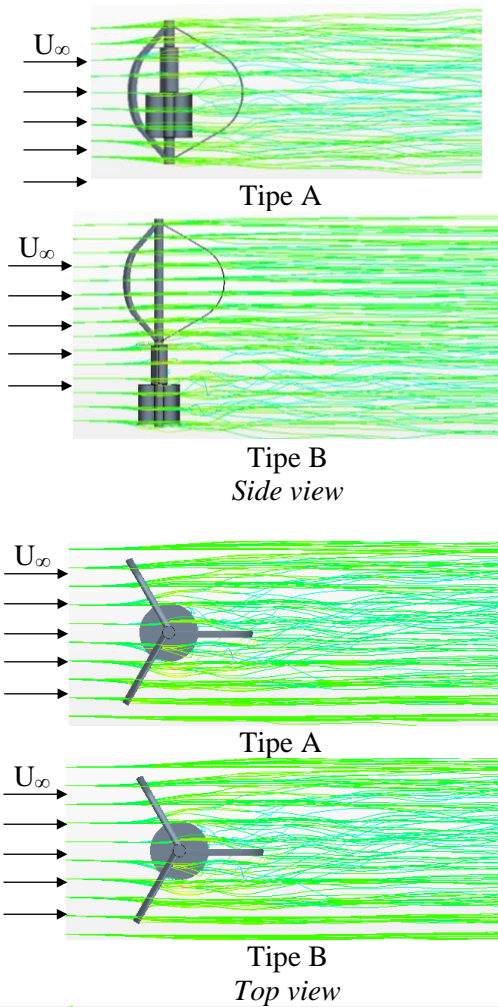
Gambar 4.32 Hasil torsi total untuk satu putaran turbin angin tipe B.

4.5 Perbandingan Tipe A dan Tipe B

Pada Gambar 4.33 dan Gambar 4.34 dapat dilihat bahwa aliran *streamline* pada konfigurasi tipe A terdapat interaksi antara sudu-sudu Savonius dan Darrieus, aliran udara yang seharusnya mengenai sudu Savonius secara langsung harus terdefleksi oleh putaran sudu Darrieus, sedangkan aliran udara yang seharusnya mengenai sudu Darrieus pada posisi tertentu juga terdefleksi oleh rotor Savonius, hal inilah yang menyebabkan turunnya performa turbin angin. Sedangkan pada konfigurasi tipe B, tidak ada interaksi aliran antara rotor Darrieus dan Savonius, sehingga torsi yang dihasilkan oleh turbin angin konfigurasi tipe B ini lebih besar dibandingkan dengan turbin angin konfigurasi tipe A.



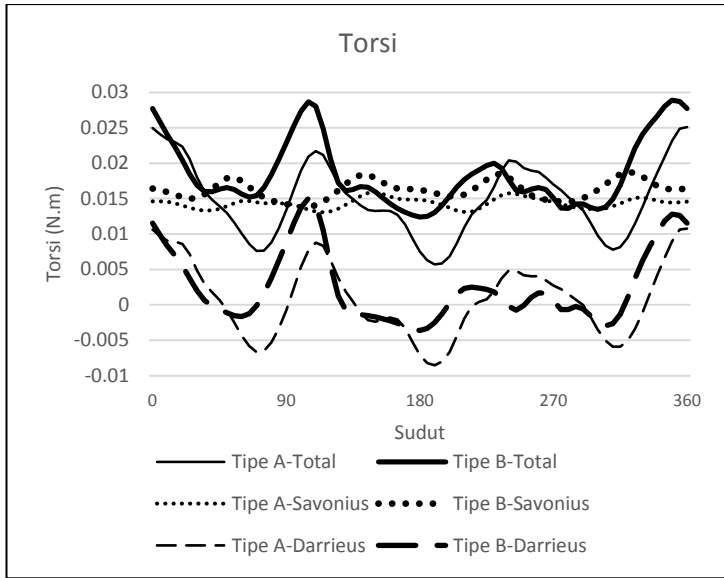
Gambar 4.33 Visualisasi *streamline* pada *isometrical view* pada kedua konfigurasi turbin angin.



Gambar 4.34 Visualisasi *streamline* pada *side view* dan *top view* pada kedua konfigurasi turbin angin.

4.6 Torsi dan Koefisien Daya

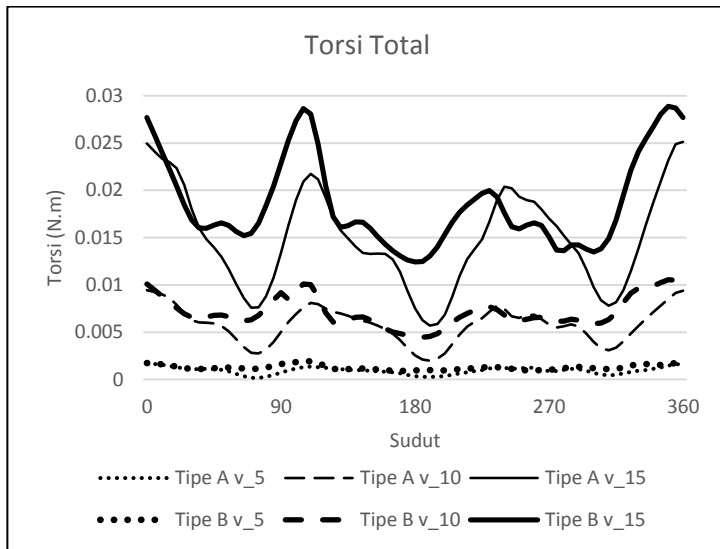
Dari data yang didapatkan dari hasil simulasi numerik untuk konfigurasi turbin angin Darrieus-Savonius tipe A dan tipe B, berikut adalah grafik torsi untuk masing-masing permodelan. Pada Gambar 4.35 dapat dilihat perbedaan antara grafik torsi Darrieus, Savonius, dan torsi total antara turbin angin tipe A dan tipe B pada kecepatan 15 m/s. Untuk torsi yang dihasilkan oleh rotor Darrieus grafik yang dihasilkan terdapat perbedaan. Titik puncak dari torsi yang dihasilkan pada turbin angin tipe A berada pada sudut 105° sedangkan pada turbin angin tipe B berada pada sudut 120° . Hal serupa terjadi pada grafik torsi yang dihasilkan oleh rotor Savonius. Puncak grafik torsi rotor Savonius untuk turbin angin tipe A terjadi pada sudut 60° sedangkan pada tipe B titik puncak grafik terjadi pada sudut 45° . Hal ini mendukung pernyataan bahwa pada tipe A terdapat interaksi antara rotor Darrieus dan Savonius sehingga menyebabkan perbedaan grafik torsi yang didapatkan antara turbin angin tipe A dan tipe B. Sedangkan untuk tren grafik torsi total menyerupai dengan tren grafik yang dimiliki oleh rotor Darrieus dikarenakan grafik torsi grafik torsi rotor Darrieus yang lebih fluktuatif dibandingkan dengan grafik torsi rotor Savonius yang cenderung konstan.



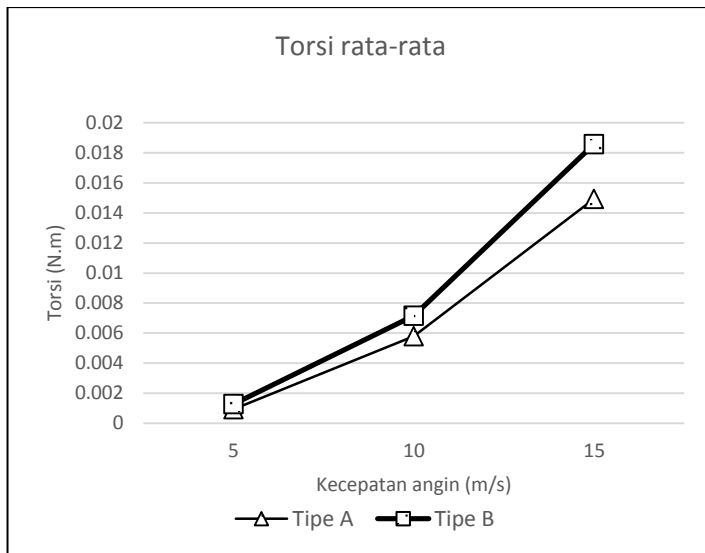
Gambar 4.35 Grafik torsi turbin angin tipe A dan tipe B.

Dari Gambar 4.36 dapat dilihat bahwa untuk masing-masing kecepatan 5, 10, dan 15 m/s grafik torsi yang dihasilkan dalam satu putaran oleh turbin angin tipe B rata-rata grafiknya berada diatas grafik torsi yang dihasilkan oleh turbin angin tipe A. Dari Gambar 4.37 dapat dilihat bahwa rata-rata torsi yang dihasilkan dalam satu putaran turbin angin untuk masing-masing konfigurasi tipe A dan tipe B mengalami kenaikan seiring bertambahnya kecepatan angin, dan torsi rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin tipe B lebih besar nilainya dibandingkan dengan torsi rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin tipe A. Hal ini dikarenakan pada turbin angin tipe B masing-masing turbin angin Darrieus maupun Savonius dapat bekerja secara optimum dikarenakan aliran udara yang mengenainya merupakan aliran *freestream* dari area *inlet*. Sedangkan untuk turbin angin tipe A aliran udara yang mengenai sudu Savonius harus terkena sapuan putaran sudu Darrieus terlebih dahulu begitupula sebaiknya

sehingga hal ini mempengaruhi kinerja dari turbin angin Darrieus maupun Savonius. Hal ini juga dibuktikan dengan nilai torsi yang dihasilkan oleh sudu Darrieus dan Savonius tipe B selalu lebih besar daripada torsi yang dihasilkan oleh sudu Darrieus dan Savonius tipe A seperti yang ditunjukkan dalam tabel 4.3.



Gambar 4.36 Grafik torsi satu putaran masing-masing permodelan.



Gambar 4.37 Grafik torsi rata-rata terhadap kecepatan angin.

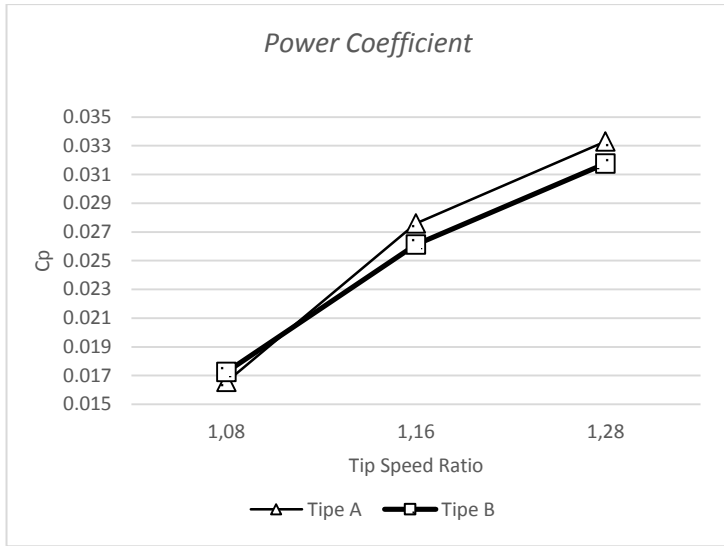
Tabel 4.3 Torsi Rata-rata Satu Putaran Turbin.

Kecepatan angin (m/s)	Tipe A	Tipe B
	Torsi total (N.m)	
5	$9,44 \times 10^{-4}$	$12,73 \times 10^{-4}$
10	$57,88 \times 10^{-4}$	$71,5 \times 10^{-4}$
15	155×10^{-4}	$185,67 \times 10^{-4}$
	Torsi rotor Darrieus (N.m)	
5	$-5,3 \times 10^{-4}$	$-3,6 \times 10^{-4}$
10	$-4,4 \times 10^{-4}$	$3,54 \times 10^{-4}$
15	$9,94 \times 10^{-4}$	$25,58 \times 10^{-4}$
	Torsi rotor Savonius (N.m)	
5	$15,05 \times 10^{-4}$	$16,64 \times 10^{-4}$
10	$63,37 \times 10^{-4}$	$68,84 \times 10^{-4}$
15	$147,33 \times 10^{-4}$	$162,32 \times 10^{-4}$

Pada Gambar 4.38 ditampilkan grafik koefisien daya terhadap *tip speed ratio*. Pada saat turbin angin memiliki *tip speed ratio* 1,08 atau pada kecepatan angin 5 m/s koefisien daya yang dimiliki oleh turbin angin tipe B lebih baik dibandingkan tipe A. Namun kemudian pada saat *tip speed ratio* 1,16 dan 1,28 atau pada saat kecepatan angin 10 dan 15 m/s koefisien daya yang dimiliki turbin angin tipe A lebih baik daripada tipe B. Pada Gambar 4.37 menunjukkan grafik torsi rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin tipe B selalu lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin tipe B, namun koefisien daya yang dimiliki oleh tipe A lebih baik daripada tipe B.

$$C_p = \frac{\text{extracted energy}}{\text{wind kinetic energy}} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A v^3}$$

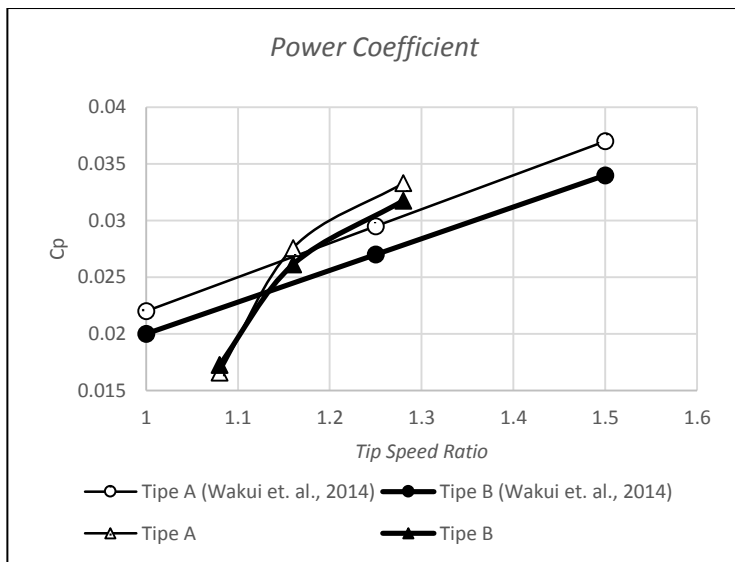
Pada persamaan diatas yang digunakan untuk menghitung koefisien daya turbin angin, notasi A yang merupakan *frontal area* dari turbin angin berbanding terbalik dengan nilai C_p . *Frontal area* yang dimiliki oleh turbin angin tipe B lebih besar dibandingkan dengan tipe A dikarenakan dimensinya yang lebih besar. Hal ini yang menyebabkan koefisien daya turbin angin tipe B lebih kecil daripada tipe A meskipun torsi yang dihasilkan turbin angin tipe B lebih besar daripada turbin angin tipe A.



Gambar 4.38 Grafik koefisien daya terhadap *tip speed ratio*.

Pada Gambar 4.39 merupakan perbandingan koefisien daya yang didapatkan dari penelitian ini dibandingkan dengan koefisien daya yang didapatkan dari penelitian yang dilakukan oleh Wakui et. al. dengan asumsi kondisi *tip speed ratio* penelitian ini sama dengan kondisi *tip speed ratio* penelitian yang dilakukan oleh Wakui et. al. Tren grafik keduanya menunjukkan tren yang sama yaitu koefisien daya naik seiring dengan bertambahnya *tip speed ratio*. Tren grafik turbin angin tipe A dari penelitian Wakui et. al. selalu di atas daripada tipe B yang berarti tipe A lebih baik daripada tipe B. Sedangkan tren grafik yang didapatkan dari penelitian ini terdapat perbedaan yaitu pada *tip speed ratio* sebesar 1,08 koefisien daya yang dimiliki oleh turbin angin tipe B lebih baik daripada tipe A sedangkan pada *tip speed ratio* 1,16 dan 1,28 koefisien daya tipe A lebih baik daripada tipe B yang sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Wakui et. al. Perbedaan ini bisa diakibatkan oleh *meshing* yang mungkin belum bisa menyelesaikan perhitungan dengan baik. Hasil yang

didapatkan dari penelitian ini juga sesuai dengan hasil yang didapatkan dari penelitian yang dilakukan oleh Rassoulinejad-Mousavi et. al. bahwa rotor Savonius yang diletakkan di tengah rotor Darrieus memiliki koefisien daya yang lebih baik dibandingkan dengan rotor Savonius yang diletakkan di bawah rotor Darrieus.



Gambar 4.39 Perbandingan grafik koefisien daya terhadap *tip speed ratio*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari studi numerik turbin angin Darrieus-Savonius ini adalah sebagai berikut :

1. Interaksi aliran yang terjadi pada turbin angin Savonius di tengah turbin angin Darrieus saling berhubungan satu sama lain. Aliran udara yang mengenai sudu Savonius telah terdefleksi akibat sapuan putar dari sudu Darrieus, dan aliran yang mengenai sudu Darrieus juga terpengaruhi oleh pergerakan sudu Savonius. Sedangkan untuk penempatan turbin angin Savonius di bawah turbin angin Darrieus tidak terdapat interaksi diantara keduanya.
2. Peletakan rotor Savonius di tengah rotor Darrieus menyebabkan turunnya performa dari masing-masing rotor diakibatkan adanya interaksi aliran diantara keduanya. Hal ini dibuktikan untuk torsi yang dihasilkan oleh rotor Darrieus pada konfigurasi tipe B bernilai lebih tinggi daripada torsi yang dihasilkan oleh rotor Darrieus pada konfigurasi tipe A dalam kondisi yang sama. Begitupula dengan torsi yang dihasilkan oleh rotor Savonius pada konfigurasi tipe B lebih besar daripada torsi yang dihasilkan oleh rotor Savonius pada konfigurasi tipe A.
3. Koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus-Savonius ini berkisar antara 0,016 hingga 0,033. Koefisien daya yang dimiliki oleh turbin angin dengan konfigurasi tipe A secara umum lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin dengan konfigurasi tipe B dikarenakan *frontal area* yang dimiliki oleh tipe B lebih besar daripada tipe A dan nilai dari *frontal area* berbanding terbalik dengan nilai koefisien daya meskipun torsi yang dihasilkan oleh tipe B lebih besar daripada tipe A pada *tip speed ratio* yang rendah. Kesimpulan ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang digunakan sebagai data pendukung.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan oleh penulis untuk penelitian yang dilakukan selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Dimensi dari sudu Darrieus bisa diperbesar dikarenakan ketika sudu Darrieus yang digunakan sangat kecil maka *meshing* yang digunakan harus semakin rapat, sehingga menyebabkan hasil simulasi yang didapatkan kurang baik.
2. Menggunakan *software* CFD yang bisa menginisiasi putaran secara otomatis sehingga hasil simulasi yang didapatkan semakin akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Bashar, Mohammad M., 2014. *Computational and Experimental Study on Vertical Axis Wind Turbine in Search for an Efficient Design*. Electronic Theses & Dissertations. Paper 1184.
- Dwiyantoro, B. A., Suphandani, V., Rahman, 2015. **Studi Eksperimental tentang Karakteristik Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Darrieus-Savonius**. Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTMXIV).
- Ghosh, A., Biswas, A., Sharma, K.K., Gupta, R., 2014. *Computational Analysis of Flow Physics of A Combined Three Bladed Darrieus Savonius Wind Rotor*. Elsevier Ltd.
- Kumar, A., Nikhade, A., 2014. *Hybrid Kinetic Turbine Rotors : A Review*. International Journal of Engineering Science & Advanced Technology.
- Rassoulinejad-Mousavi, S.M., Jamil, M., Layeghi, M., 2013. *Experimental Study of a Combined Three Bucket H-Rotor with Savonius Wind Turbine*. World Applied Sciences Journal 28 (2): 205-211.
- Saha, U.K., Thotla, S., Maity, D., 2008. *Optimum Design Configuration of Savonius Rotor Through Wind Tunnel Experiments*. Elsevier Ltd.
- Tjiu, Willy., Marnoto, Tjukup., Mat, Sohif., Ruslan, Mohd Hafidz., Sopian, Kamaruzzaman., 2014. *Darrieus Vertical Axis Wind Turbine for Power Generation I : Assessment of Darrieus VAWT Configuration*. Elsevier Ltd.

Wakui, T., Takagi, H., Hashizume, T., 2014. ***Hybrid Configuration of Darrieus and Savonius Rotor for Stand-Alone Power System.*** International Journal of Engineering Science & Advanced Technology.

BIODATA PENULIS



Ilmawan Yanuarsyah dilahirkan di Gresik, 8 Januari 1994, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Sjaiful Bachri dan Ninik Cholifah. Penulis memulai pendidikan formal di TK Islam Bakti I Gresik, kemudian menyelesaikan pendidikan di SD Muhammadiyah 2 Gresik pada tahun 2006, SMP Muhammadiyah 12 Gresik pada tahun

2009, dan SMA Negeri 5 Surabaya pada tahun 2012. Penulis meneruskan pendidikan formal di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan mengambil Jurusan Teknik Mesin. Menjadi bagian dari keluarga M55 merupakan kebanggaan tersendiri bagi penulis.

Hingga tugas akhir ini diselesaikan, penulis aktif dalam menggali potensi dirinya. Semasa duduk di bangku sekolah dasar penulis sering menjadi delegasi sekolah untuk bersaing pada olimpiade matematika. Pada sekolah menengah pertama penulis aktif di organisasi IPM dan menjadi bagian dari tim basket sekolah. Pada sekolah menengah atas penulis aktif di organisasi MPK dan menjadi anggota aktif PMR serta menjadi tim dayung sekolah. Pada masa perkuliahan penulis aktif menjadi anggota Himpunan Mahasiswa Mesin, SMRM, menjadi bagian dari Beswan Djarum 30, dan aktif dalam sebuah grup *touring* yaitu Smala Riders Community. Untuk informasi, saran, dan keperluan yang berhubungan dengan penelitian penulis dapat dihubungi melalui alamat email ilmawan.ys@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan